

# Vakuum-Siede-Behandlung zur Trocknung fester Abfallstoffe und Maissilage

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

## Dissertation

von  
**M.Sc. ANNA KATARINA DO NASCIMENTO ÁVILA**  
aus Paulista/PE - Brasilien

eingereicht am	02. November 2007
mündliche Prüfung am	14. Januar 2008
Berichterstatter	Prof. Dr.-Ing. K. Fricke Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl Prof. Dr.-Ing. habil. W. Bidlingsmaier Prof. Dr.-Ing. W. Niemeier



Im Herzen eines jeden Menschen benfindet sich ein von Gott geschaffenes Vakuum,  
das durch nichts Erschaffenes erfüllt werden kann als allein durch Gott,  
den Schöpfer, so wie er sich in Christus offenbart.

*Blaise Pascal*

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde am Leichtweiß-Institut, Abteilung Abfall- und Ressourcenwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Klaus Fricke angefertigt. Ihm möchte ich besonders für die Betreuung dieser Arbeit danken.

Ich möchte allen Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften, die zu dieser Arbeit beigetragen haben, herzlich danken. Ein ganz besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Kai Münnich für die Hilfsbereitschaft und interessanten Vorschläge. Auch bei Dipl.-Geoökol. Tobias Bahr möchte ich mich herzlich bedanken.

Für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes danke ich Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl, Prof. Dr.-Ing. W. Niemeier und Prof. Dr.-Ing. habil. W. Bidlingmaier.

Mein Dank gilt auch an der Dipl. Ing. Christian Widmer sowie der Firma ISKA, Schmutz und Hartmann für die Anfertigung und Bereitstellung der Anlagen.

Dem Abfallzweckverband Südniedersachsen und der FAL danke ich für die Bereitstellung der untersuchten Substrate.

Dr.-Ing. W. Tegethoff von dem Institut für Thermodynamik bedanke ich mich herzlich für die wertvollen Gespräche, die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Dr.-Ing. Carlos Bier danke ich für die Hilfe bei der Formatierung dieser Arbeit sowie Dipl.-Ing. Cristiane Boxler für die Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Dank gilt auch CAPES/DAAD, die mich finanziell mit einem Stipendium während der Zeit meiner Arbeit gefördert haben.

Besonders möchte ich meiner Familie und allen, die mir während meiner Zeit in Deutschland durch Gebete und ermutigende Worte geholfen haben, danken. Und vor allen möchte ich ganz herzlich Jesus danken. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.



## Summary

Since 2005, it is not allowed to deposit untreated waste in Germany. To meet the legal requirements of “Abfallablagerungsverordnung”, mechanical-biological waste treatment (MBT) can be used to stabilize solid waste biologically. For MBT drying comes into operation if wet residues are to be conditioned for further processing.

Solid waste and energy crops can usually not be used for the generation of substitute fuel without restrictions due to high water content. High water contents lead to:

- low calorific values
- restricted conditioning character for e.g. separation of materials, pelleting and a reduction of harmful substances
- impairment for suitability for storage
- reduced transportability

As for thermal utilisation of waste mechanical and thermal drying have proved to be proper technologies. By biological and physical drying as well as sorting solid waste is conditioned for thermal utilisation as a substitute fuel, whereas a water content lower than 15% is required [11].

Most installed driers in mechanical biological waste treatment in Germany are part of biological or physical drying. Physical drying is usually implemented in the form of drum driers. Both biological and physical driers cause expenses for exit air purification to meet the requirements of German regulations (“TA Luft”). Biological drying generates more exit air than physical drying [23].

Furthermore biological driers have a higher space requirement, a longer treatment period (7 to 21 days according to Fricke et al., 2005 [16]), and bring a less homogenous water content of the output compared to physical driers.

Chemical and microbiological reactions of solid waste and energy crops may cause major corrosion problems in biological treatment plants [5], [61].

Physical drying procedures have already been used in industry for a long time. There are different procedures, which are applied in drying technology although many of them cannot be named ideal, especially in consideration of energy input, output quality, drier control, safety, and environmental pollution.

The Department of Waste Management at the Technical University Braunschweig is involved in the trial of different conditioning procedures for solid waste and energy crops. One of these technologies is the vacuum-boiling treatment, which includes vacuum-boiling extraction and vacuum-boiling drying.

By vacuum-boiling drying solid residues can be dried for the generation of substitute fuel with the combined impact of heat and vacuum. This technology features a short drying time and a minimal exit air amount. By the use of vacuum drying corrosion as well as fire and explosion hazard (higher in physical driers) can be minimized because the vacuum process causes a low oxygen content.

First experiments with a bench-scale model have proved the general applicability of vacuum-boiling drying treatment for solid waste. The knowledge gained from this indicates that this treatment may have both an ecological and economical advantage over biological and atmospheric-physical drying treatment due to shorter treatment periods and lower exit air amounts.

Vacuum drying is used for the treatment of many products. Recently it has been used for drying municipal solid waste and digestion residues as well [14].

The aim of this thesis are research and evaluation of the application of vacuum-boiling drying to dry solid waste and energy crops with the objective of stabilisation and substitute fuel production. Therefore experiments with different plants on a bench-scale, pilot plant and industrial scale are conducted.

With this research project, the vacuum-boiling drying treatment will be evaluated as a technology to dry solid waste and energy crops in consideration of energy demand and emissions as well as output quality. Fundamentals and optimisation potentials for the development of an energy-efficient waste utilisation and treatment procedure for solid waste are to be determined.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2 Status Quo der Trocknungstechnik</b>	<b>5</b>
2.1 Trocknungsverfahren . . . . .	12
2.1.1 Biologische Trocknung . . . . .	12
2.1.2 Thermische Trocknung . . . . .	15
<b>3 Grundlagen der Trocknung</b>	<b>25</b>
3.1 Einleitung . . . . .	25
3.2 Stoffbewegung bei der Trocknung . . . . .	27
3.3 Wasseranteile und ihre Bindungsarten . . . . .	28
3.3.1 Wasseranteile im Substrat . . . . .	29
3.3.2 Bindungsformen an das Substrat . . . . .	30
3.3.3 Energieaufwand zum Überwinden der Wasserbindungskräfte . .	34
3.4 Thermodynamik der Trocknung . . . . .	37
3.4.1 Wärmeübertragung bei der Trocknung . . . . .	37
3.4.2 Die Erwärmung des Substrates . . . . .	43
3.5 Trocknungsverlauf und Trocknungsabschnitte . . . . .	44
3.5.1 Der erste Abschnitt der Trocknungskurve . . . . .	47
3.5.2 Der Knickpunkt der Trocknungskurve . . . . .	48
3.5.3 Der zweite Abschnitt der Trocknungskurve . . . . .	49
3.5.4 Der dritte Abschnitt der Trocknungskurve . . . . .	49
3.6 Trocknung unter Vakuum . . . . .	51
3.6.1 Physikalische Grundlagen der Vakuumtrocknung . . . . .	51

<b>4</b>	<b>Entwicklung des Versuchsprogramms</b>	<b>57</b>
4.1	Bewertungskriterien für die Auswertung . . . . .	60
4.1.1	Laboranlage . . . . .	60
4.1.2	Halbtechnische Versuchsanlage . . . . .	61
4.1.3	Großtechnische Versuchsanlage . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Material und Methoden</b>	<b>63</b>
5.1	Versuchsanlagen . . . . .	63
5.1.1	Laboranlage . . . . .	63
5.1.2	Halbtechnische Versuchsanlage . . . . .	66
5.1.3	Großtechnische Versuchsanlage . . . . .	71
5.2	Untersuchte Substrate . . . . .	74
5.2.1	Maissilage . . . . .	74
5.2.2	Restabfälle . . . . .	75
5.2.3	Perkolationsrückstand aus der Perkolationsanlage Buchen . . .	77
5.2.4	Restabfälle nach der Vakuum-Siede-Extraktion . . . . .	77
5.3	Analytik und Messmethoden . . . . .	78
5.4	Versuchsvarianten . . . . .	81
5.4.1	Laboranlage . . . . .	81
5.4.2	Halbtechnische Versuchsanlage . . . . .	81
5.4.3	Großtechnische Versuchsanlage . . . . .	84
5.5	Auswertungsmethoden - Statistik und Fehlerbetrachtung . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Versuchsdurchführung und Ergebnisse</b>	<b>87</b>
6.1	Laboranlage . . . . .	88
6.1.1	Ergebnisse . . . . .	89
6.2	Halbtechnische Versuchsanlage . . . . .	94
6.2.1	Vorversuche . . . . .	94
6.2.2	Trocknung von Maissilage . . . . .	95
6.2.3	Trocknung von mechanisch aufbereiteten Restabfällen . . . . .	109
6.3	Großtechnische Versuchsanlage . . . . .	124
6.3.1	Ergebnisse . . . . .	125
<b>7</b>	<b>Auswertung und Diskussion</b>	<b>129</b>
7.1	Laboranlage . . . . .	129
7.2	Halbtechnische Versuchsanlage . . . . .	130
7.2.1	Auswertung der Versuche mit Maissilage . . . . .	130



---

7.2.2	Auswertung der Versuche mit mechanisch aufbereiteten Rest- abfällen . . . . .	133
7.2.3	Vakuum-Siede-Trocknung von Silage und Restabfall im Vergleich	135
7.2.4	Energetische Beurteilung der halbtechnischen Anlage . . . . .	136
7.2.5	Optimierungsansätze für die halbtechnische Versuchsanlage . .	140
7.2.6	Regressionsmodell . . . . .	148
7.3	Großtechnische Versuchsanlage . . . . .	150
7.4	Vergleich der Vakuum-Siede-Trocknungsanlagen mit einem biologi- schen Trocknungsverfahren . . . . .	152
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerung und Empfehlungen</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Energiebilanz und Druckverlauf</b>	<b>161</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>166</b>



# Symbolverzeichnis

## Lateinische Symbole

$WG$	Wassergehalt	[%]
$H_o$	oberer Heizwert	[kJ/kg]
$TS$	Trockensubstanz	[%]
$oTS$	organische Trockensubstanz	[%]
$FS$	Frischsubstanz	[%]
$g$	Erdbeschleunigung	[cm/s <sup>2</sup> ]
$h$	kapillare Steighöhe	[cm]
$E$	Bindungsenthalpie	[kJ/kmol]
$m$	Masse	[kg]
$T$	Temperatur	[°C oder K]
$dT$	Temperaturgradient	[-]
$Q$	Wärmeenergie	[kJ]
$A$	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Wärmekapazität	[J/K]
$c$	spezifische Wärme des Körpers	[J/kg·K]
$BSB_5$	Biochemischer Sauerstoffbedarf	[mg/l]
$h_v$	Verdampfungsenthalpie	[kJ/kg]

## Griechische Symbole

$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/K·m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Koeffizienten Regressionsmodell	[-]
$\sigma$	Spannung	[g/s <sup>2</sup> oder erg/cm <sup>2</sup> ]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	[W/K·m]
$\varphi$	Winkel	[°C]
$\rho$	dicht	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Emissionsverhältnis des Körpers	[-]

## Abkürzungen

$Gew. - \%$	Gewichtsprozent
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlung
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

TU Braunschweig	Technische Universität Braunschweig
VST	Vakuum-Siede-Trocknung
VSE	Vakuum-Siede-Extraktion
SST	Stoffstromtrennanlagen
MBS	Mechanisch-Biologische Stabilisierung
MPS	Mechanisch-Physikalische Stabilisierung
MBV	Mechanisch-Biologische Vorbehandlung
Fe-Metall	Eisenmetall
NE-Metall	Nichteisenmetall
BRAM	Brennstoff aus Müll
GE	Geruchseinheit
RTO	Regenerative Thermische Oxidation

# Kapitel 1

## Einleitung und Zielsetzung

Seit 2005 dürfen in Deutschland keine unbehandelten Abfälle mehr deponiert werden. Zur Einhaltung der Anforderungen der Abfallablagerungsverordnung werden unter anderen mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen (MBA) eingesetzt, um Restabfälle biologisch zu stabilisieren. Die Trocknung kommt bei einer MBA in der Regel zum Einsatz, wenn nasse Rückstände für eine weitere Verwertung konfektioniert werden sollen.

Eine Vielzahl fester Abfallstoffe und Energiepflanzen sind auf Grund ihrer hohen Wassergehalte nur eingeschränkt zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen geeignet. Hohe Wassergehalte führen u.a.:

- zu niedrigen oberen Heizwerten,
- zur Einschränkung der Konfektionierungseigenschaften wie Stofftrennung, Pelletierung und Schadstoffentfrachtung,
- zur Beeinträchtigung der Lagerfähigkeit und
- zur Verringerung der Transportfähigkeit.

Hinsichtlich der energetischen Verwertung von Abfällen erweisen sich die mechanische und thermische Trocknung als Verfahrensstufe vor der Verbrennung geeignet. Durch biologische oder physikalische Trocknung sowie Sortierungsstufen werden die Abfallprodukte zur energetischen Verwertung als Ersatzbrennstoff vorbereitet, wobei die Voraussetzung ein Wassergehalt von unter 15 Gew.-% ist [11].

Die meisten installierten Trocknungsanlagen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Deutschland gehören, wie in Kapitel 2 erwähnt, zur biologischen oder physikalischen Trocknung. Bei der physikalischen Trocknung kommt bei den meisten Anlagen der Trommeltrockner zum Einsatz. Sowohl bei den biologischen als auch bei den physikalischen Trocknungsanlagen fallen jedoch Kosten für die Abluftbehandlung an, um die Anforderungen der TA-Luft einzuhalten, wobei die biologische Behandlung im Vergleich zur physikalischen höhere Volumen an zu reinigender Abluft liefert [23].

Die biologische Trocknung hat im Vergleich zur physikalischen Trocknung einen höheren Flächenbedarf, längere Behandlungszeiten (zwischen 7-21 Tagen nach Fricke [16]) und führt zu einer inhomogeneren Wassergehaltsverteilung im Produkt. Abfälle und nachwachsende Rohstoffe können durch chemische oder mikrobiologische Vorgänge insbesondere bei biologischen Behandlungsanlagen Korrosionsprobleme verursachen [5], [61].

Im industriellen Bereich finden physikalische Trocknungsverfahren bereits seit längerem Anwendung. Es gibt verschiedene Verfahrensprinzipien, die in der Trocknungstechnik zur Trocknung von Restabfallstoffen angewendet werden. Die Technologien funktionieren jedoch nicht immer optimal. Besonders in Hinblick auf den Energieaufwand, die Produktqualität, die Trocknersteuerung, den Sicherheitsgrad und die Umweltbelastung des Verfahrens besteht Optimierungsbedarf.

Am Lehrstuhl für Abfallwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig befinden sich verschiedene Verfahren zur Aufbereitung von festen Abfallstoffen und Energiepflanzen in der Erprobung. Eine dieser Technologien basiert auf dem Verfahren der Vakuum-Siede-Behandlung. Zu diesem Verfahren gehören zwei Behandlungsprozesse, die Vakuum-Siede-Extraktion und die Vakuum-Siede-Trocknung.

Mittels der Vakuum-Siede-Trocknung können feste Rückstände zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen unter Wärmeeinwirkung und angelegtem Vakuum getrocknet werden. Die Vakuum-Siede-Trocknung zeichnet sich dabei durch kurze Trocknungszeiten bei minimalem Abluftvolumen aus. Die Brand- und Explosionsgefahr (bei physikalischem Trockner höher eingestuft) werden sowie Korrosion wegen des geringen Sauerstoffanteils während des Vakuumtrocknungsprozesses minimiert.

Erste Voruntersuchungen zur Vakuum-Siede-Trocknung in einer Technikumsanlage zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit des Verfahrens auch für feste Abfallstoffe. Die hierbei gesammelten Erfahrungen lassen vermuten, dass das Verfahren auf Grund der kürzeren Behandlungsdauer (2 bis 3 Stunden) und den geringeren zu behandelnden Abluftvolumina ökologische und ökonomische Vorteile gegenüber biologischen und

atmosphärisch-physikalischen Trocknungsverfahren aufweist.

Vakuumtrocknung wird für die Verarbeitung verschiedener Produkte angewendet. Diese Technologie wird seit kurzem auch zur Trocknung fester Siedlungsabfälle und Gärreste eingesetzt [14].

Untersucht werden soll in dieser Arbeit eine Verwendung der Vakuum-Siede-Trocknung als Vorbereitungstechnologie zur Trocknung von Restabfallstoffen und Energiepflanzen zur Produktstabilisierung sowie zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Untersuchungen in verschiedenen Anlagen im Labormaßstab, halb- und großtechnischen Maßstab werden dazu durchgeführt.

Mit dem Forschungsvorhaben wird die Vakuum-Siede-Trocknung als Technologie zur Trocknung von Restabfallstoffen und Energiepflanzen hinsichtlich des Energieaufwands sowie der Qualität der Emissionen und des vakuumgetrockneten Substrats beurteilt. Grundlagen und Optimierungsmaßnahmen für die Entwicklung eines energieeffizienten Abfallverwertungs- und Behandlungsverfahrens für feste Abfallstoffe sollen ermittelt werden.





## Kapitel 2

# Status Quo der Trocknungstechnik

Die Effizienz eines Trocknungsverfahrens wird nicht nur durch den Wasserentzug bestimmt. Das getrocknete Material muss ebenfalls andere Qualitätskriterien erfüllen. Wesentliche Qualitätsmerkmale sind Konsistenz, Zusammensetzung und Empfindlichkeit gegenüber Temperatur- und Feuchtigkeitseinwirkungen. Anhand dieser Merkmale kann ein geeignetes Trocknungsverfahren ausgewählt werden.

Chemisch-physikalische Eigenschaften wie Wassergehalt, Korngröße, Heizwert und Schüttdichte, die mittels Trocknung optimiert werden können, beeinflussen wesentlich die Leistung der Abfallbehandlung oder die weitere Konfektionierung.

In der Landwirtschaft und in einigen Industriezweigen (z.B. Lebensmittel-, Chemische Industrie) wird die Trocknung verwendet, um schneller, betriebssicherer und zuverlässiger produzieren zu können. Der Entzug der Feuchtigkeit eines Materials führt zu einer Verbesserung seiner Lager- und Transportfähigkeit, seiner Verwendbarkeit und seiner Konservierungseigenschaften bzw. seiner Stabilisierung. Durch die Minimierung des Gewichtes und des Platzbedarfes für die Lagerung ist es beispielsweise möglich, eine optimale Anlagenauslastung zu erzielen.

Schulenburg [72] und Scholz [70] haben durch Charakterisierung von Hausmüll gezeigt, wie große Mengen an Wasser sowie Inertstoffe Eigenschaften wie den Heizwert beeinträchtigen können. Die Energiebilanzänderung von Abfallprodukten beim Verbrennungsvorgang ist bei Rotter [65] bei unterschiedlichen Wassergehalten un-

tersucht worden (WG=32,6 Gew.-% mit  $H_o=8.800$  kJ/kg auf WG=60 Gew.-% mit  $H_o=5.200$  kJ/kg). Rotter [65] wies nicht nur eine verminderte Energieleistung bei feuchtem Material nach, sondern fand auch einen erhöhten Energieverlust über die Abgase. Erwartungsgemäß sind Verbrennungsprozesse somit sehr von der Abfallqualität abhängig. Die Integration von mechanisch biologischer Abfallbehandlung (MBA) zur Verbesserung der Abfallqualität vor der thermischen Behandlung ist aus diesem Grund Gegenstand zahlreicher Diskussionen und Untersuchungen [54].

Unterschiedliche Verfahrensprinzipien mit Integration eines Vorbehandlungsverfahrens vor der thermischen Verwertung werden später zusammengefasst und kurz beschrieben.

Ca. 28% der in Deutschland produzierten Siedlungsabfälle werden mittels MBA-Technik vorbehandelt [85], das entspricht ca. 7 Mio. Mg pro Jahr. Die Trocknung von Siedlungsabfällen ist meistens ein Grundbestandteil dieser Behandlungsverfahren.

Abfallprodukte werden durch biologische oder physikalische Trocknung (wie auch Sortierungsstufen) zur energetischen Verwertung als Ersatzbrennstoff vorbereitet.

Die mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen wurden von Thiel [79] und Thomé-Kozmiensky [83] in vier Verfahrenskonzepte unterteilt (siehe Abbildung 2.1):

- SST - Stoffstromtrennanlagen (Abfallsplitting)
- MBS - Mechanisch-Biologische Stabilisierung
- MPS - Mechanisch-Physikalische Stabilisierung
- MBV vor TB - Mechanisch-Biologische Vorbehandlung vor Thermischer Behandlung

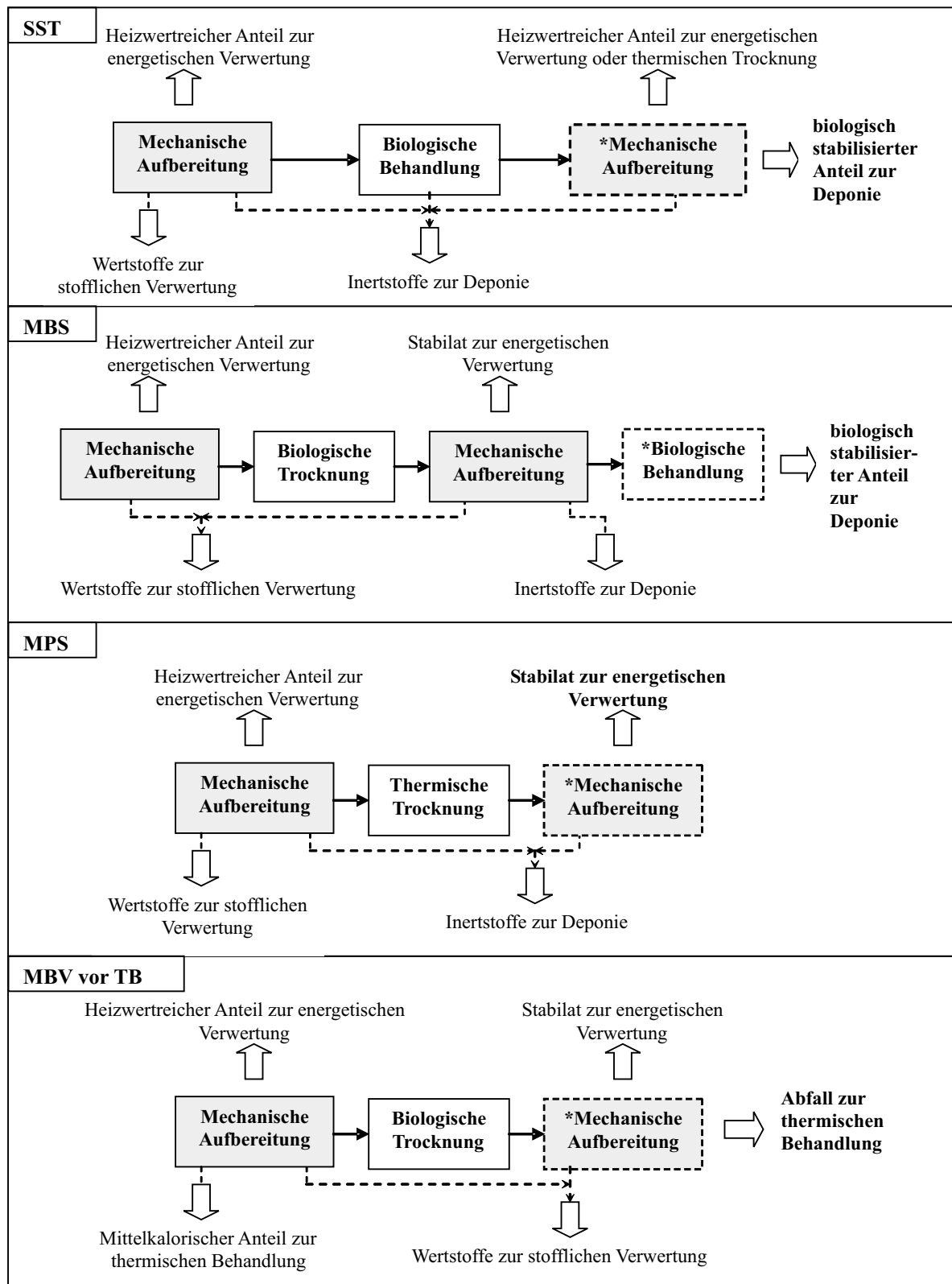


Abbildung 2.1: MBA - Verfahrenskonzepte ( \* = optional) [79]

Die Mechanisch-physikalische Stabilisierung beinhaltet nach einer mechanischen Aufbereitung eine thermische Trocknung, während die Mechanisch-biologische Stabilisierung und die Mechanisch-biologische Vorbehandlung vor thermischer Behandlung eine biologische Trocknung besitzen. Stoffstromtrennanlagen verfügen auch über eine biologische Stufe (z.B. Rotte, Perkulationsverfahren, Trockenvergärung, Nassvergärung), um einen maximalen Abbaugrad der organischen Abfalls substanz zu erzielen. Obwohl die Stabilisierungsverfahren mit rein physikalischer Trocknung keine biologischen Prozesse enthalten, werden sie auf dem Markt aufgrund des üblichen Sprachgebrauchs immer noch mit dem Ausdruck „Mechanisch-biologisches Verfahren“ bezeichnet [82], [79]. Abbildung 2.2 gibt den prozentualen Anteil der Verfahrenskonzepte für MBA-Anlagen in Deutschland wieder.

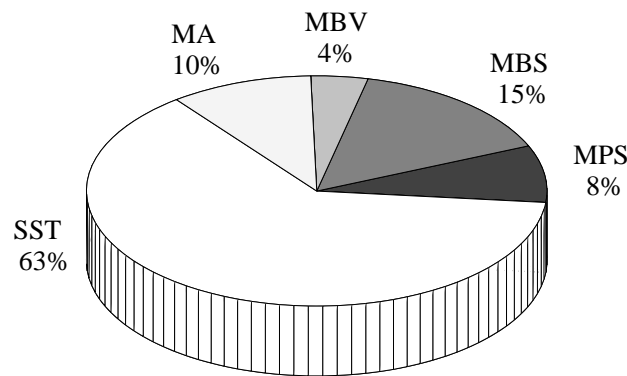


Abbildung 2.2: Prozentualer Anteil der Mechanisch-Biologischen Anlagen in Deutschland (48 Anlagen) [81], [59]

Eine gute Darstellung von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland und ihren Behandlungsstufen wurde von Thomé-Kozmiensky [81] und ASA [59] erarbeitet. Circa 31% der zitierten Anlagen weisen entweder eine biologische oder eine thermische Trocknung als Vorbereitungstechnik auf, wobei 23% der biologischen Behandlungsstufen eine „biogene Trocknung“ des Abfalls enthalten. Als biogene Trocknung wird hier vorrangig der Entzug des Wassers des Materials mit möglichst geringem Organikaufschluss verstanden. Nur 27% der Anlagen mit Trocknungsstufe nutzen eine thermische Trocknung, obwohl diese wesentliche Vorteile gegenüber der biologischen Trocknung bietet (siehe Abbildung 2.3).

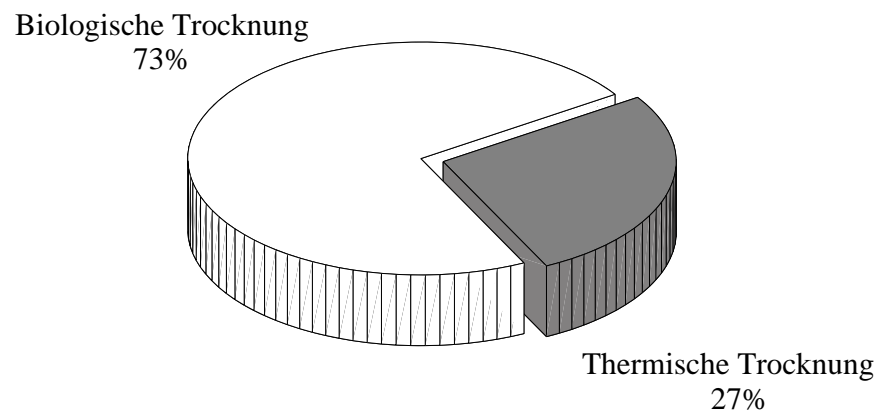


Abbildung 2.3: MBA - Anlagen in Deutschland nach Trocknungsvorgang (Stand 02/2007) [81], [59]

Die Nachteile der biologischen Trocknung sind:

- großer Flächenbedarf,
- lange Behandlungszeit,
- große Volumen von belasteter Abluft, die eine entsprechend aufwendige Abluftreinigung erfordert.

Die thermische Trocknung mittels Primärenergieträger (z.B. Heizöl, Erdgas) ist im Vergleich zur biologischen Trocknung im Bau und bei der Wartung kostengünstiger und erreicht zudem niedrigere Restfeuchtgehalte [10].

Das Volumen der zu reinigenden Abluft bei der biologischen Trocknung ist wesentlich größer als bei der thermischen Trocknung. Dolle [11] zeigt, dass bei einer Feuchteabnahme von 30 auf 10 Gew.-% bei der thermischen Trocknung 1/3 weniger Abluft entsteht als bei der biologischen Trocknung.

Drei Arten von Trocknungsvorgängen lassen sich unterscheiden:

- Biologische Trocknung,
- Mechanische Trocknung,
- Thermische Trocknung.

Die biologische Trocknung des Materials erfolgt unter Ausnutzung der Eigenwärme, die bei dem aeroben Abbau der organischen Bestandteile erzeugt wird. Fricke [14]

zitiert zwei mechanisch-biologische Trocknungsanlagen mit aeroben biologischen Vorgängen, eine davon mit vorgeschalteter Anaerobstufe. Diese werden später näher beschrieben.

Mechanische Trocknung auch als mechanische Entwässerung bezeichnet, läuft ohne Zuführung von Wärme ab. Das Material wird dabei mittels Abpressen, Zentrifugation und Filtration entfeuchtet. Für Produkte mit hohem Wasseranteil, z.B. Klärschlamm oder Perkulationsoutput, ist sie eine Verfahrensstufe, die vor der Trocknung ausgeführt werden kann. Bei dem Vorhandensein von wertvolle Bestandteile (Salze, Nährstoffe, Vitamine) in dem Wasseranteil, die in der Substanz belassen werden sollen, kann die mechanische Entwässerung zur Trocknung nicht eingesetzt werden [32].

Um einen möglichst hohen Trocknungsgrad zu erhalten, wird die thermische Trocknung eingesetzt. Die Wärme wird in diesem Prozess zugeliefert, um die Wasserbindungen in dem Feststoff zu zerstören. Abfälle müssen auf einen Restwassergehalt von unter 15 Gew.-% getrocknet werden, um als Ersatzbrennstoffe benutzt werden zu können. Für die Pelletierung sogar unter 10 Gew.-% [14], eine Entfeuchtrate, die nur mit einer thermischen Trocknung erreicht werden kann.

Rückstände des Perkulationsverfahrens wurden in dieser Arbeit thermisch unter Vakuum getrocknet. Thermische Trocknung wurde bisher nicht als Vorbereitungstechnik für den Rückstand des Perkulationsverfahrens eingesetzt. Der Perkulationsfeststoff wird entweder durch eine Nachrotte (ISKA-Verfahren) oder mittels der biologischen Trocknung mit nachträglichem Anschluss einer mechanischer Stofftrennung (ZAK-Verfahren) weiter behandelt [81].

Informationen über den Einsatz von thermischen Trocknungsverfahren bei Bioabfall wurden nicht gefunden. Dagegen wird Biomasse wie Holzspäne seit Jahrzehnten mittels Trommeltrockner und Rohrbündeltrockner getrocknet [1]. Arlt [1] nimmt an, dass wegen der Ähnlichkeit von entwässertem Klärschlamm und entwässertem Bioabfall, Klärschlammrockner auch problemlos für entwässerte Bioabfallprodukte eingesetzt werden können. Wobei entwässerter Bioabfall im Vergleich zu entwässertem Klärschlamm größere Trockensubstanzgehalte aufweist.

Andererseits zitiert Sabery [66], dass die Trocknung von Abfällen nicht mit Futtermittelindustrie- und Klärschlammrocknern durchgeführt werden kann, obwohl nicht viele Erfahrungen aus der Praxis zur Verfügung stehen, die diese Aussage belegen. Während der Trocknung werden Schadstoffe über Abluft und Kondensationswasser freigesetzt, die den Trockner beeinträchtigen und die Umwelt belasten. Zu beachten ist, dass Restabfall in der Regel größere Schadstoffgehalte als Klärschlamm

besitzt (siehe Tabelle 2.1). Aufgrund dessen haben Verfahren mit wenig Abluftentstehung (z.B. Vakuumtrockner) einen Vorteil, da die Abluftproblematik vermindert wird.

Tabelle 2.1: Schadstoffbelastung von Klärschlamm und Hausmüll [38]

	<b>Müll</b>	<b>Klärschlamm</b>
<b>Schadstoffe</b>	[mg/kg TS]	[mg/kg TS]
Chlor	6900	300
Schwefel	2700	5200
Blei	500	330
Cadmium	10	6,5
Kupfer	400	400
Quecksilber	4	3
Zink	1500	1710

## 2.1 Trocknungsverfahren

Bei Trocknungsverfahren lassen sich biologische und physikalische Trocknungsverfahren unterscheiden. Zum physikalischen Verfahren gehören die mechanische und thermische Trocknung. Die Verfahrensprinzipien wurden schon in den letzten Abschnitt erklärt. Zielsetzungen der Trocknung der Abfallstoffe sind wie schon erwähnt:

- Massenreduktion,
- Erhöhung des Heizwertes,
- Verhinderung der biologischen Abbauprozesse, um ein lager- und transportfähiges Produkt herzustellen,
- Verbesserung der Stoffstromtrennung bzw. Konfektionierungseigenschaften (z.B. Windsichten, Sieben, Pelletierung, usw.).

Die biologische und thermische Trocknung sind die wesentlichen Verfahren, um eine höherer Trocknungsrate zu erreichen. Im Folgenden werden für beide Verfahren die potenziellen Möglichkeiten zur Trocknung von Abfallstoffen beschrieben.

### 2.1.1 Biologische Trocknung

Die biologische Trocknung erfolgt durch mikrobiologische Prozesse ohne Einsatz von Fremdenergie [80]. Nachfolgend werden zwei wesentliche biologische Verfahren dargestellt.

#### Mechanisch-biologische Endrotte

Das mechanisch-biologische Endrotteverfahren folgt dem Ziel, die Stabilisierung des Materials durch weitestgehenden biologischen Abbau zu erreichen, um ein Produkt zu erzeugen, das entweder deponiert oder energetisch/stofflich verwertet werden kann. Hier ist der Abbauprozess mit der Bioabfallkompostierung vergleichbar. Es findet eine Massenreduktion durch den Abbau der organischen Substanz und die Verdunstung des Wasseranteils statt. In einer Rotte zeigt Schwing [73] Werte der Massenreduktionen von ca. 35 bis 55 % und Trockensubstanzgehalte, die zwischen 30 und 42 Gew.-% liegen.



Nach der mechanischen Aufbereitung erfolgt eine aerobe Rotte, in der die biologisch abbaubaren organischen Substanzen weitgehend abgebaut werden. Dieses passiert unter Bewässerung, da Wasser die Lebensbedingungen der Mikroorganismen verbessert und Teile der mikrobiellen Stoffwechselreaktionen an wässrige Lösungen gebunden sind.

Verschiedene Anlagentechniken mit biologischer Behandlung sind auf dem Markt. Diese umfassen offene Rotteverfahren (Überdach) bis hin zu komplett geschlossenen Systemen mit Abluftbehandlung. Ebenfalls ist eine Kombination mit einer Anaerobstufe zu finden [59]. Circa 1/3 der MBA in Deutschland integrieren eine Vergärungsstufe vor die biologische Trocknung (Nachrotte), um Biogas, geringeren Platzbedarf und eine Minderung der Geruchemissionen zu gewinnen.

### **Mechanisch-biologische Stabilisierung**

Während das Rotteverfahren Kohlenstoff durch biologische Behandlung reduziert, erzielt die mechanisch-biologische Stabilisierung, ein kohlenstoffreiches Produkt, um es durch Trocknung des Materials als Ersatzbrennstoff nutzen zu können. Der Kohlenstoff wird hier nicht als „Schadstoff“ betrachtet, da es die energetische Leistung des Produktes erhöht [89]. Der biogene Kohlenstoffgehalt des Abfalls beträgt über 50% und spielt eine wichtige Rolle, da die daraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen als klimaneutral angesehen werden können.

Die Fa. Herhof hat eine mechanisch-biologische Restabfallbehandlung nach dem Trockenstabilatverfahren entwickelt. Durch biologische Aktivität wird eine Erhitzung des Materials in Herhof-Rotteboxen®(luft- und flüssigkeitsdichte Stahlbetonkörper mit Druckbelüftung) bewirkt, die das Material auf 15 Gew.-% WG trocknen kann.

Zuerst findet eine mechanische Vorbereitung des Materials statt. Es wird grob zerkleinert, homogenisiert und von Fe-Metallen befreit. Im Laufe von 10 Tagen in den Rotteboxen wird das Material auf 20 Gew.-% WG getrocknet.

Untersuchungen von Wiemer [89] konnten eine Erhöhung des Heizwertes um 35 - 40% bei einem Wassergehalt des Ausgangsmaterials von 30 – 40 Gew.-% (FS) mit durchschnittlichen Heizwerten von 9000 kJ/kg nach sieben Tagen Behandlung nachweisen.

Die anfallenden Kondensate des Trockenstabilatverfahrens können über ein zweistufiges Reinigungsverfahren mechanisch-biologisch gereinigt und anschließend über offene Verdunstungskühler verdunstet werden. Zur Abluftreinigung wird ein thermisch-regenerativer Prozess eingesetzt.

Das getrocknete Material kann mit Einsatz von Sortiertechniken in Einzelfractionen wie beispielsweise Brennstoff-Trockenstabilate, Wertstoffe (Fe- und NE-Metalle, Glas, Mineralfraktionen), Störstoffe (z.B. Batterien) eingeordnet werden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist bei Wiemer [89] zu finden.

Sechs der sieben in Deutschland installierten mechanisch-biologischen Stabilisierungsanlagen nutzen Herhof-Boxen, um Restabfälle zu stabilisieren [59].

### 2.1.2 Thermische Trocknung

Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die Kriterien, die oft zur Klassifikation von thermischen Trocknern eingesetzt werden.

Im Folgenden werden thermische Trockner vorgestellt, die zurzeit im Bereich der Abfall- und Klärschlamm-trocknung betrieben werden. Wie schon erwähnt, können einige Klärschlamm-trockner auch zur Trocknung von Abfallstoffen eingesetzt werden.

Tabelle 2.2: Klassifikation der Trocknerbauarten [44]

Kriterium	Typen
Betrieb	Batch-Verfahren (diskontinuierlich) kontinuierlich
Wärmezuführung	Konvektion Leitung Strahlung Kombinationen mehrerer Arten
Bewegung	Stationär Bewegend, Umwälzung, dispergiert
Druck	Vakuum atmosphärisch
Wärmeträger (Konvektion)	Luft Dampf Abgas
Temperatur	unterhalb der Siedetemperatur oberhalb der Siedetemperatur unterhalb des Gefrierpunktes
Verweilzeit	Kurz (< 1min) Mittel (1-60 min) Lang (> 60 min)

## Trommeltrockner

Das Feuchtprodukt wird durch die Drehbewegung des Rohres durchmischt und Wasser mittels Stoff- und Wärmeaustausch mit heißem Rauchgas (bis zu  $1000^{\circ}\text{C}$ ) entzogen, wobei große Abluftmengen entstehen. Wärme wird durch das Rauchgas mittels Konvektion in des Substrats übertragen [12].

Im Inneren des Rohres sind Transportschaufeln eingebaut, die das Material anheben, um einen besseren Kontakt mit dem Trocknungsgas zu garantieren. Die Verweilzeit des Trocknungsgutes hängt von der Trommeldrehzahl, Trommelneigung, Strömungsgeschwindigkeit des Trocknungsgases und von der Stauvorrichtung am Trommelende ab (siehe Abbildung 2.4).

Der Trommeltrockner wird zurzeit am häufigsten zur thermischen Trocknung in MBA-Anlagen verwendet [81], [83].

Ein Beispiel für eine Trommeltrockneranlage ist die der Fa. Vandenbroek (siehe Abbildung 2.5), die Ersatzbrennstoff aus Gewerbe- und Hausmüll herstellen kann. Daten von Kragting [35] zeigen Endfeuchtgehalte von ca. 10–15 Gew.-% bei einem Restabfall mit einer Anfangsfeuchte von maximal 35 Gew.-%. Die Eintragsmaterialien sind heizwertreiche Fraktionen, die durch mechanische Aufbereitung abgetrennt wurden. Durchsatzmengen von 7,5 t/h mit Schüttgewichten von  $150\text{ kg/m}^3$  zeigen eine Wasserverdampfungs-masse von ca.  $1.100\text{ kg/h}$  und Abluftvolumen von ca.  $7.000\text{ Nm}^3/\text{h}$ . Daten über den energetischen Aufwand wurden nicht angegeben. Biomassetrommeltrockner (Bagasse, Grünabfälle, Holz, Dünger, Fruchtfleisch, BRAM) bieten sich ebenfalls an. Das getrocknete Produkt kann anschließend pelletiert und zur thermischen Behandlung weitergeleitet werden.

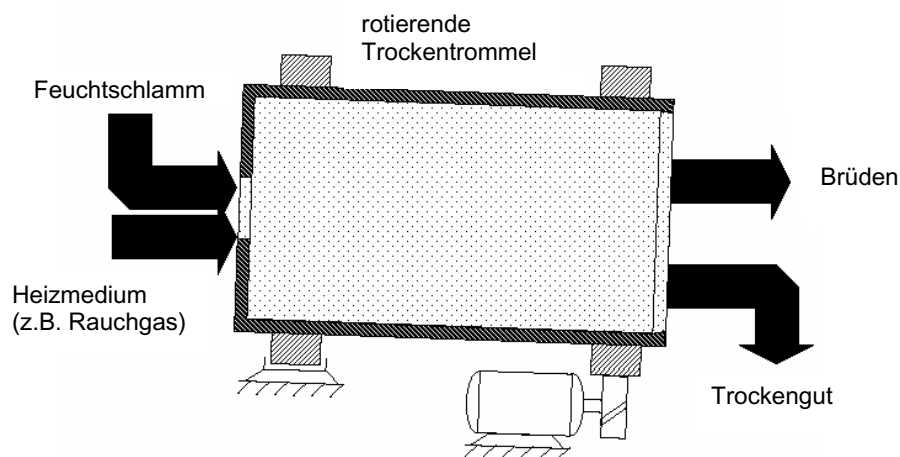


Abbildung 2.4: Funktionsprinzip des Trommeltrockners [87]

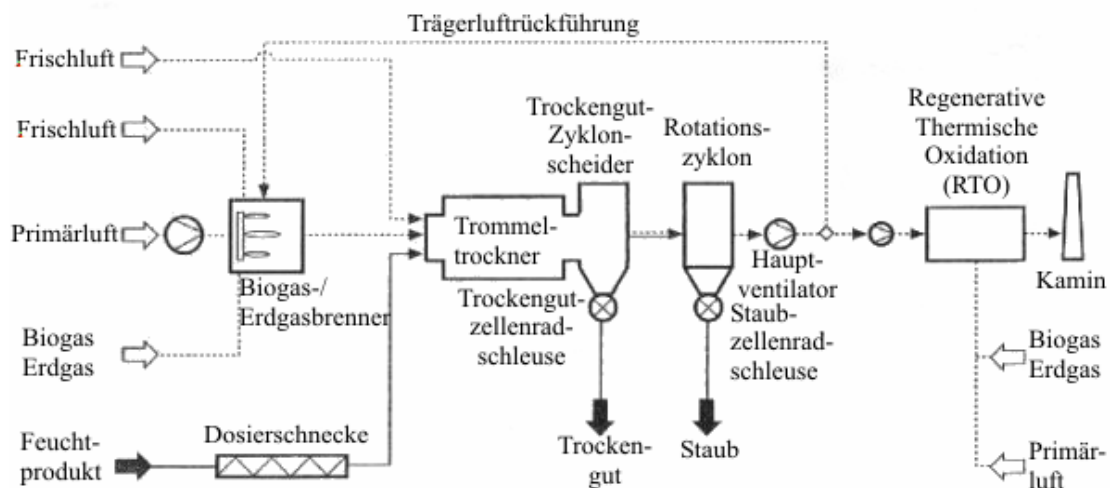


Abbildung 2.5: Trommeltrockneranlage von Vandenbroek [35]

## Bandrockner

Bandrockner werden im Bereich Pharma- und Lebensmittelindustrie, Sägespänetrocknung sowie zur Klärschlamm-trocknung eingesetzt [3]. Beim Bandrockner (Abbildung 2.6) wird das zu trocknende Material auf einem aus VA-Stahl bestehenden Förderband gleichmäßig verteilt und durch die Trockenkammer geführt. Der Wärmeübergang erfolgte mittels Konvektion, wobei Heißgas durch Öffnungen in dem perforierten Förderband zugeführt wird. Am oberen Teil des Trockners werden die entstehenden Brüden abgezogen. Der Wärmeträger wird im Kreislauf in den Trockner geführt.

Nach Bewertung von Vockrodt [87] hat der Bandrockner deutliche Sicherheitsrisiken bezüglich Brand- und Explosionsgefahr.

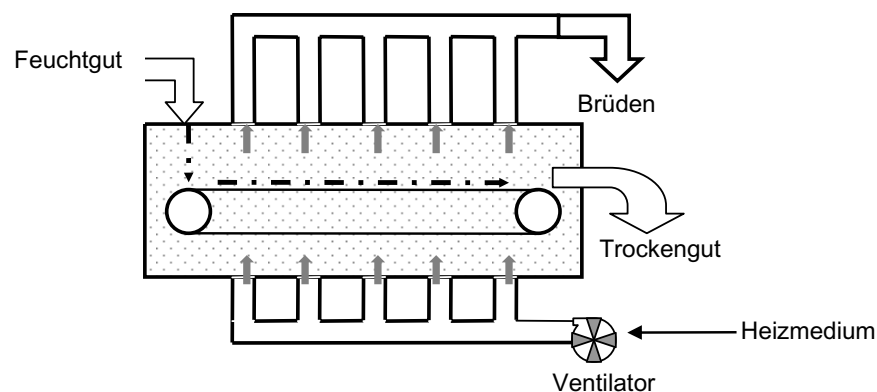


Abbildung 2.6: Funktionsprinzip des Bandrockners [87]

## Schachttrockner

Schachttrockner (Abbildung 2.7) bestehen aus zwei nebeneinander stehenden Schächten, die konisch nach oben verjüngt sind. Die Seitenwände sind aus starren Lamellen konstruiert, die so angeordnet sind, dass die Luft über eine große Fläche in das Trocknungssubstrat einströmt (Konvektionstrockner) und das Gut nicht seitlich austreten kann. Feuchtes Gut wird von oben kontinuierlich eingefüllt und das getrocknete Gut unten abgezogen. Der Schachttrockner kann für Restabfall eingesetzt werden [29]. Die Trocknungsluft wird in drei voneinander getrennten Sektoren abwechselnd von links nach rechts bzw. umgekehrt quer zur Bewegungsrichtung des Gutes durch die Trocknungsschächte geführt. Für eine Trocknung von 5 Mg/h Abfallinput wird bei einer Trocknereingangstemperatur von 150°C ein Abluftmassenstrom von 6.000 kg/h freigesetzt.

Diese Art von Trockner wird vor allem im landwirtschaftlichen Bereich zur Trocknung von Erntegütern eingesetzt.

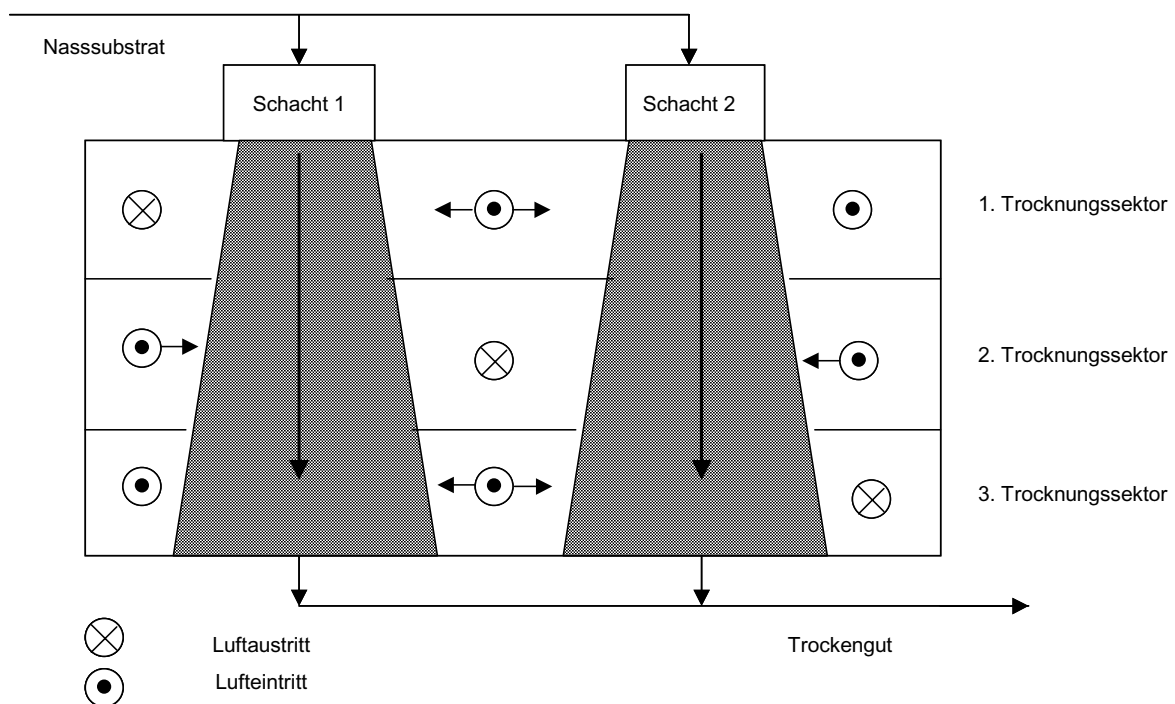


Abbildung 2.7: Schachttrockner – Schematische Darstellung [29]

## Wirbelschichttrockner

Der Wirbelschichttrockner ist eine Kombination aus Kontakt- und Konvektionstrocknung (Abbildung 2.8). Eingeblassene, heiße Wirbelluft oder Wirbelgase bilden eine stationäre Wirbelschicht aus, in der das zu trocknende Substrat intensiv durchmischt werden. Wärme- und Stofftransport werden dadurch begünstigt. Auf das Trocknungsergebnis wirkt sich ebenfalls positiv aus, dass im Wirbelschichtreaktor der Temperaturverlauf über den gesamten Querschnitt weitestgehend konstant ist. Die Wärmezufuhr erfolgt entweder über das Trocknungsgas oder es werden zusätzlich Wärmetauscher (Rohrbündel oder Platten) in die Wirbelschicht eingebracht.

Das über einen Düsenboden im unteren Trocknerbereich eingetragene Gas dient vorrangig zur Erzeugung der Wirbelschicht und zum Abtransport der freiwerdenden Brüden. Das Kreislaufgas wird einem Kondensator zugeführt und über ein Gebläse wieder in den Trockner eingebracht. Aufgrund dieser Konzeption fallen nur geringe Abgasmengen an, die einer geeigneten Abgasbehandlung zuzuführen sind. Für die Trocknung von Klärschlamm wird der Wirbelschichttrockner so geregelt, dass sich eine Temperatur von  $85^{\circ}\text{C}$  in der Wirbelschicht einstellt. Durch diesen niedrigen Temperaturbereich treten meistens keine kritischen Betriebszustände auf [87]. Brand- und Explosionsgefahr sind bei Wirbelschichttrocknern jedoch hoch einzustufen.

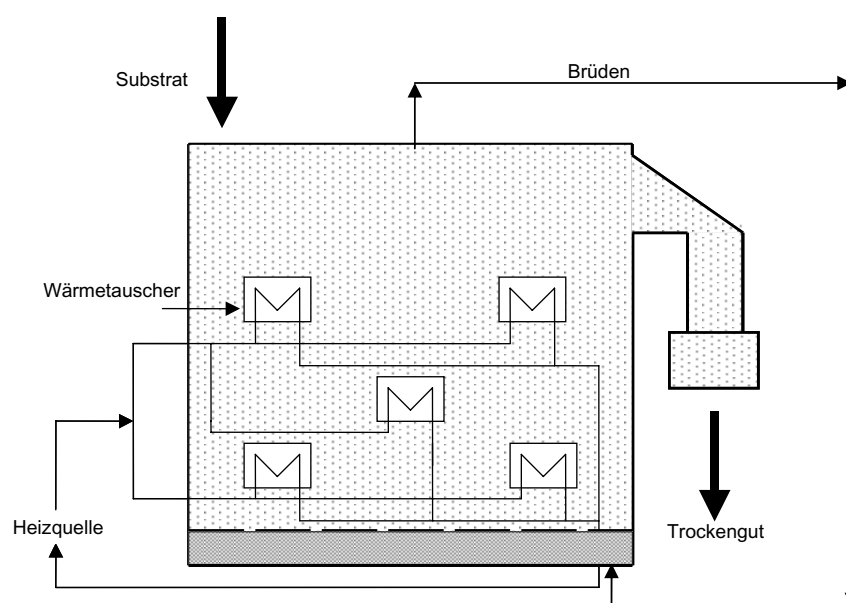


Abbildung 2.8: Wirbelschichttrockner – Schematische Darstellung [87]

## Rohrbündeltrockner

Beim Rohrbündeltrockner werden die im Inneren des Trockners befindlichen Rohrbündel mit Sattedampf beheizt, während das Trocknungsgut durch den rotierenden Mantel ständig durchmischt und auf die Rohrbündel aufgeworfen wird (Abbildung 2.9). Eine Rückmischung ist in der Regel notwendig. Es handelt sich dabei um einen Kontaktrockner, der bereits in der Praxis zur Klärschlamm-trocknung eingesetzt wird [1].

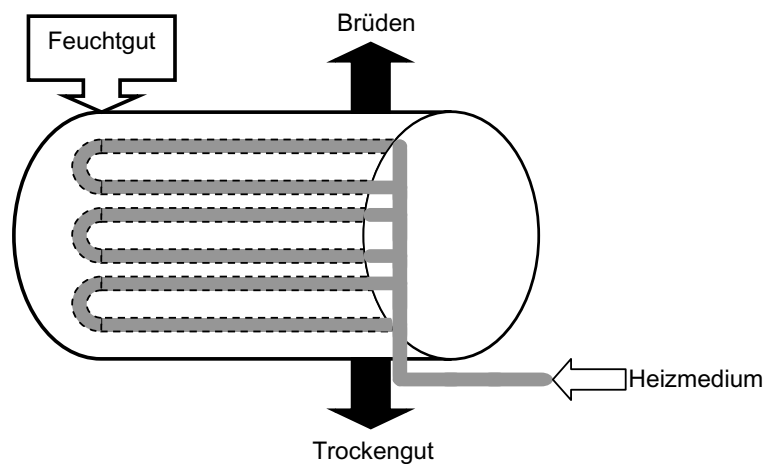


Abbildung 2.9: Funktionsprinzip des Rohrbündeltrockners [87]

## Dünnschichtrockner

Dünnschichtrockner bestehen aus einem horizontalen beheizten Mantel mit doppelwandigem Zylinder und einem innen liegenden Rotor (Abbildung 2.10). Über den Doppelmantel des Zylinders wird dem Trockner Wärmeenergie in Form von Sattedampf oder Thermoöl zugeführt. Der Rotor ist mit Verteil- und Transportelementen ausgestattet, die aufgeschraubt oder aufgeschweißt sein können. Das Feuchsubstrat wird in einer 5 bis 15 mm dicken Schicht auf das Innere des Trockners durch dieses Verteilelement abgestreift. Die Übertragung der Kontaktwärme in das Substrat wird auf diese Weise sichergestellt.

Die notwendigen Verdampfungsleistungen, um Trocknungsgrade höher als 70% zu erreichen, sind unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht interessant. Dünnschichtrockner werden auf diese Weise vorrangig zur Teiltrocknung eingesetzt. Die Anwendung des Verfahrens für Rest- oder Bioabfälle ist unrealistisch, da bei Dünnschichtrocknern eine geringe Schichtdicke des zu trocknenden Feuchsubstrates auf der Wär-



metauscherfläche erforderlich ist.

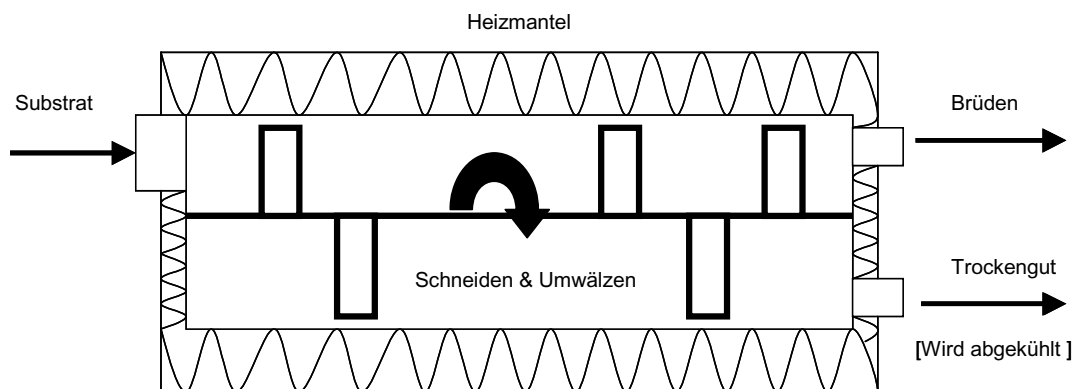


Abbildung 2.10: Dünnschichttrockner – Schematische Darstellung [87]

### Scheibentrockner

Der Scheibentrockner ist ein indirekt beheizter Kontaktrockner. Die Beheizung kann mittels Sattedampf bis ca. 10 bar oder Thermoöl erfolgen. Der Trockner besteht aus einem starren zylindrischen Mantel und einem Rotor (Abbildung 2.11). Der Rotor setzt sich aus einer Hohlwelle mit aufgeschweißten hohlen Scheiben zusammen, die vom Heizmedium durchströmt werden. Eine große Heizflächendichte wird durch den geringen Abstand der Scheiben erzeugt (bezogen auf das Trockenvolumen).

Volltrocknungsanlagen führen zu spezifischen Verdampfungsleistungen von ca. 7 bis 10 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h und Teiltrocknungsanlagen mindestens zu solchen von 11 kg H<sub>2</sub>O/m<sup>2</sup>h. Die freiwerdenden Brüden werden über einen im oberen Bereich des Stators angebrachten Brüdenom aus dem Trockner ausgetragen.

Dieses Trocknermodell scheint für Siedlungsabfälle nicht anwendbar zu sein, da die Scheiben des Trockners hohen Verschleiß- und Korrosionsbeanspruchungen unterliegen, denen durch geeignete Materialwahl bzw. entsprechende Verschleißreserven Rechnung getragen werden muss [87].

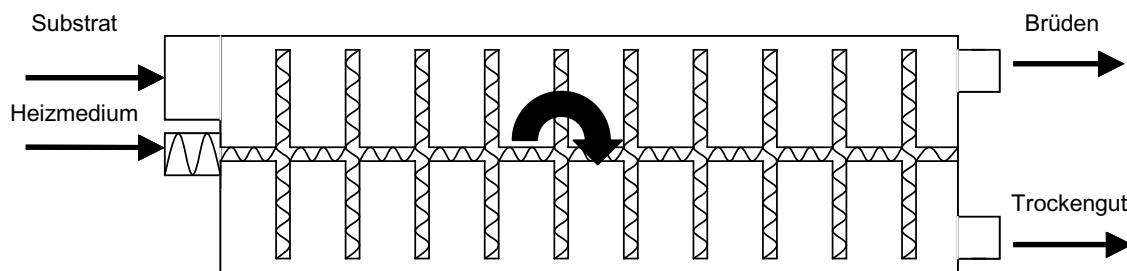


Abbildung 2.11: Scheibentrockner – Schematische Darstellung [87]

## Vakuumtrockner

Bei der Trocknung unter Vakuum siedeln Flüssigkeiten bereits bei niedrigeren Temperaturen als bei normalem Atmosphärendruck (1013 mbar). Probleme wie Denaturierungen werden dadurch verringert. Die Trocknungszeiten werden auch gegenüber biologischen Trocknungsverfahren wesentlich verkürzt.

Die prozessbedingte Sauerstoffarmut führt zur Minimierung der Brand- und Explosionsgefahr beim Trocknungsprozess, während bei konventionell angewandten Trommel- und Bandtrocknern diese Gefahr als hoch einzustufen ist.

Im industriellen Bereich finden physikalische Trocknungsverfahren unter Vakuum seit langer Zeit Anwendung. Beispiele hierfür sind die Lebensmittelaufbereitung und der pharmazeutische Bereich. Diese Technologie wird seit Kurzem auch zur Trocknung fester Siedlungsabfälle und Gärreste eingesetzt. Vakuumtrocknung wird außerdem bei der Aufkonzentrierung von Abfällen aus Atomkraftwerken eingesetzt [4].

Kontaminierte Schlämme und Böden werden mittels Vakuumtrocknung behandelt, wobei einige Schadstoffe von Feststoffen durch Verdampfung getrennt und zurückgewonnen werden können [58].

Eine Vakuumtrocknungsanlage besteht gewöhnlich aus einem Trockner, einer Heizanlage, einem Kondensationssystem und einem Vakuumsystem. Abbildung 2.12 zeigt den Aufbau einer gewöhnlichen Vakuumtrocknungsanlage. Der Prozess kann entweder diskontinuierlich (Batch-Verfahren) oder kontinuierlich ablaufen. Der Aufbau einer kontinuierlichen Vakuumtrocknung ist vergleichbar mit dem eines Batch-Verfahrens. Jedoch gibt es zusätzlich Dosier-, Ein- und Austragssysteme für das Produkt.

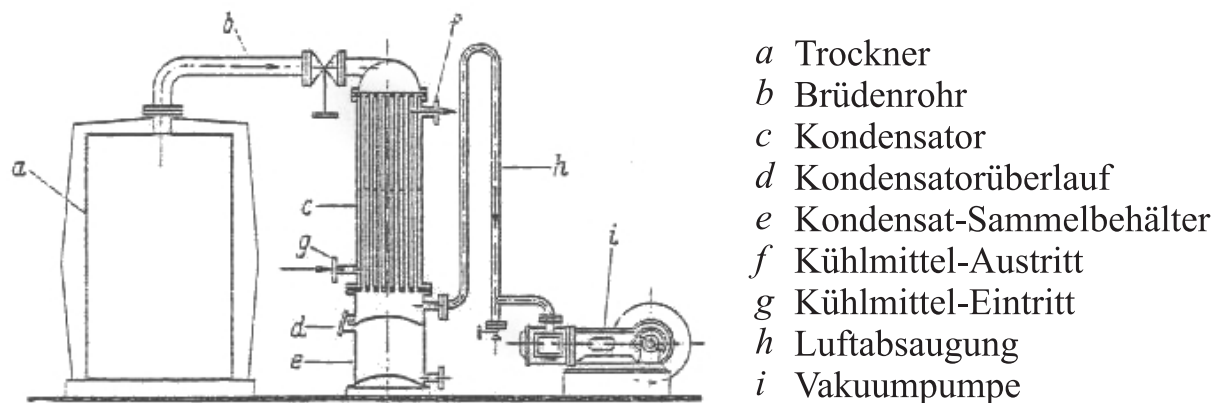


Abbildung 2.12: Vakuumtrocknungsanlage [41]

Im Betriebszustand, wird das Feuchtmaterial zuerst in den Trockner gefüllt. Das Vakuumsystem senkt den Druck im Trockner. Gleichzeitig erhitzt die Mantelheizung das Material indirekt über die Wände des Trockners. Die Mantelheizung kann elektrisch oder durch Heizmittel betrieben werden. Die Feuchte wird in Form von Dampf aus dem Material entzogen und zum Kondensator geleitet, wo der Dampf kondensiert. Ist der Trocknungsablauf vollständig durchgeführt, wird das getrocknete Material aus dem Trockner ausgeladen.

Nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz ist das Volumen einer bestimmten Gasmenge bei konstanter Temperatur umgekehrt proportional zum Druck [27]. Je niedriger der Druck, desto größer ist das Volumen, denn die Zahl der Moleküle nimmt ab, wohingegen deren Bewegungen zunehmen. Wird z.B. aus einem Substrat 1kg Wasser unter 50 mbar bei Siedetemperatur ( $32,9^{\circ}\text{C}$ ) verdampft, so beträgt das Gasvolumen ca.  $28\text{ m}^3$  [41]. Üblicherweise werden Kondensatoren zwischen den Vakuumtrockner und der Vakuumpumpe eingesetzt, um eine Vakuumpumpe mit niedriger Leistung einsetzen zu können. Die entstehenden Dampfvolumina, die sich nicht im Kondensator niederschlagen, sind aus den Vakuumräumen durch die Pumpe abzusaugen. In diesem Fall bewirken die Kondensatoren einen Druckabfall in dem Trockner. Aufgrund dessen müssen die Kondensatoren auf tiefere Temperaturen (normalerweise  $15^{\circ}\text{C}$  oder mehr unter der Siedetemperatur) eingestellt werden [8].

Vakuumtrockner werden indirekt u.a. mittels elektrischer Energie, Abdampf, Warmwasser oder Thermoöl beheizt. Bei Unterdrücken über ca. 20 mbar (Grobvakuum) ist die Kondensation der Dämpfe meistens noch mit Kühlwasser oder Kühlluft mög-

lich [41]. Aber unterhalb von 20 mbar bis zum Fein- und Hochvakuumbereich (siehe Tabelle 3.6), werden besondere Maßnahmen zur Kondensierung erforderlich.

Wärme wird dem Substrat von der Wand des Vakuumtrockners durch Kontakt und Strahlung zugeführt. Eine Erhöhung des thermischen Nutzungsgrads des Trocknungsprozesses unter Vakuum ist durch einen relativ niedrigen Temperaturgradienten zwischen Trockner und Umgebung im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren zu erwarten.

Es gibt eine Vielfalt von Vakuumtrocknerbauarten: Vakuum-Bandrockner, Vakuum-Wirbelschichttrockner und andere [24], [8]. Das Produkt kann im Trockner entweder ruhen oder durchmischt werden.

Weitere Informationen über die Vakuumtrocknung können am Ende des Kapitels 3 nachgelesen werden.

## **Solartrocknung**

In warmen und trockenen Ländern erweist sich die Solartrocknung als gute Alternative bei der Trocknung von Landwirtschaftsprodukten. Die Solartrocknung von Klärschlamm wird in transparenten Gewächshauskonstruktionen durchgeführt. Die Wärme wird mittels Strahlung auf das Substrat übertragen. Der Schlamm lagert auf dem Boden und wird regelmäßig gewendet. Be- und Entlüftung sowie Luftumwälzung in der Halle bewirken eine erhöhte Verdunstung. Aufgrund des großen Platzbedarfs ist die Schlammsolartrocknung nur für kleine Gemeinden zu empfehlen [1], [6].

## Kapitel 3

# Grundlagen der Trocknung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für den allgemeinen Trocknungsvorgang betrachtet. Es werden die Stoffbewegung bei der Trocknung sowie verschiedene Wassergehalte mit deren Bindungsarten und Bindungsstärke an das Substrat erläutert. Zusätzlich werden die Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung des Wärmestroms bei verschiedenen Erwärmungen dargestellt. Zuletzt werden das Trocknungsverhalten unter Vakuum und die Einflüsse auf den Trocknungsprozess diskutiert.

### 3.1 Einleitung

Unter Trocknung wird der Wasserentzug aus einer Substanz verstanden. Das Trocknungsverfahren selbst ist nicht nur ein Verfahren zum Wasserentzug von Feststoffen, sondern steht auch für den Begriff eines Produktionsverfahrens zur Erstellung von Trockenprodukten mit bestimmten Eigenschaften.

Die maximale Erwärmung des Stoffes wird meistens durch die erwünschte Qualität des Endproduktes bestimmt. Die Trocknerart und das Trocknungsverfahren selbst legen die Trocknungsbedingung und die Eigenschaften des Substrates im feuchten und trockenen Zustand fest [17]. Wie schon erwähnt, lassen sich zwei Arten von physikalischer Trocknung unterscheiden:

- mechanische Trocknung und
- thermische Trocknung.

Kneule [32], Keey [28] und Mujumdar [49] sowie viele andere Experten beziehen den Begriff „Trocknung“ nur auf die thermische Trocknung, die mechanische Trocknung wird physikalisch korrekt als mechanische Entwässerung bezeichnet.

Erfahrungen aus der Klärschlammbehandlung zeigen, dass Trockenrückstände zwischen 20 und 35 Gew.-% nach einer Eindickung des Klärschlammes erreicht werden können [34]. Bei der Herstellung von Ersatzbrennstoffen darf der Wassergehalt jedoch nur 15 Gew.-% betragen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine alleinige Entwässerung daher nicht geeignet.

Die thermische Trocknung ist energieaufwendiger als die mechanische Entwässerung. Aus diesem Grund wird das Substrat bei manchen Verfahren (z.B. Klärschlamm-trocknung) vor der thermischen Trocknung mithilfe von Zentrifugen, Nutschen etc. entfeuchtet.

Im Allgemeinen kann die Trocknung, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, durch die Kopplung von Wärme-, Dampf- und Flüssigkeitsbewegung dargestellt werden. Die Erkenntnis all dieser Gesetzmäßigkeiten ergibt ein Bild von dem gesamten Vorgang.

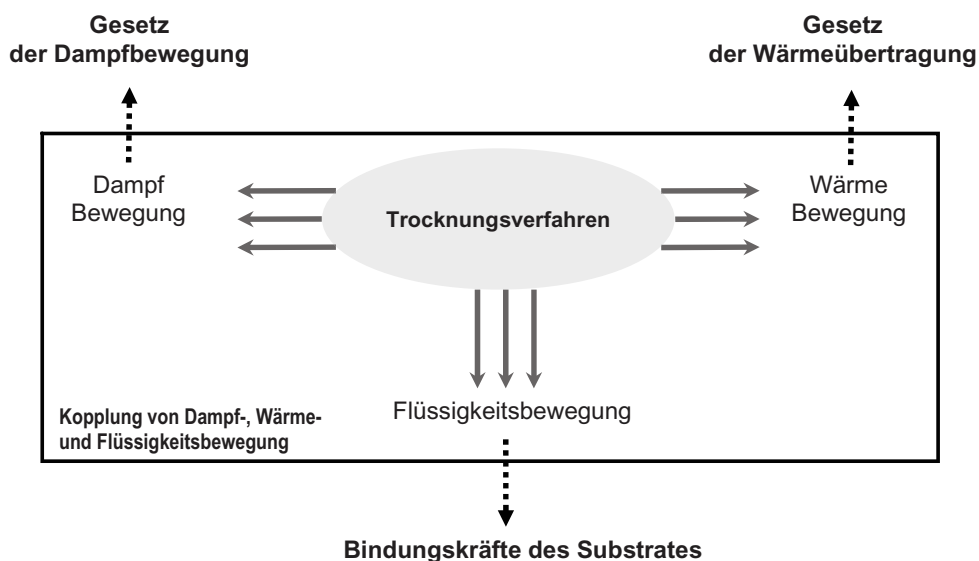


Abbildung 3.1: Wärme- und Stofftransportprozesse der thermischen Trocknung

Wärme, Dampf und Flüssigkeit werden während der Trocknung gleichzeitig übertragen. Bei hinreichender Substratfeuchte hängt die Trocknungsgeschwindigkeit vom Wärme- und Stoffübergang an der Substratoberfläche ab. Bei geringer Substratfeuchte wird die Trocknungsgeschwindigkeit durch den Wärmetransport und die Feuchtewanderung im Substratinneren bestimmt und maßgebend durch die Gesetze der Feuchtigkeitswanderung (Flüssigkeitsbewegung) beeinflusst. Dabei sind das hygroscopische

Verhalten, die Porenstruktur und die Wärmeleitfähigkeit des Substrates entscheidend. Die Arten der Feuchtigkeitsbindung an das Substrat werden im Abschnitt 3.3.2 ausgeführt.

Die Wärmebewegung beschäftigt sich mit der Energiezufuhr in das Feuchtsubstrat und wird durch das Gesetz der Wärmeübertragung bestimmt. Dabei werden drei Arten des Wärmetransports unterschieden: Wärmeleitung, konvektiver Wärmeübergang und Wärmestrahlung. Das Grundgesetz der Thermodynamik der Trocknung wird im Abschnitt 3.4 kurz erläutert.

## 3.2 Stoffbewegung bei der Trocknung

Ein entscheidender Prozess bei dem Trocknungsvorgang ist die Stoffbewegung der Feuchtigkeit aus dem Substrat. Feuchtigkeit wird bei der Trocknung aus dem Substrat transportiert und in die Umgebungsluft übertragen. Die Geschwindigkeit dieses Transports hängt wesentlich von der Stärke der Wasserbindung an den Partikeln ab [39], [25]. Durch die folgenden Effekte kann die Feuchtigkeitsbewegung entstehen:

- Kapillar- oder Oberflächenkräfte,
- Dampfdruckgefälle in der umgebenden Atmosphäre.

Am Anfang des Prozesses ist der Feuchtigkeitsabtransport bei feuchtem Substrat durch Kapillarkräfte dominant. Dampfdruckgefälle fangen an, Bedeutung zu gewinnen, je trockener das Substrat ist. Die weniger stark gebundenen Wassermoleküle beginnen sich von den Partikeln zu lösen. Wird mehr Energie zugeführt, fangen auch stärker gebundene Moleküle an, sich zu lösen. Die Feuchtigkeit des Substrates nimmt dadurch im zeitlichen Trocknungsverlauf ab.

Um einen Aggregatzustand von der flüssigen in die dampfförmige Phase zu erreichen, muss Energie zugeführt werden. Der Prozess des Phasenwechsels durch Wärmezufuhr wird Verdunstung oder Verdampfung genannt. Unterhalb des Siedepunktes wird von Verdunstung und am Siedepunkt von Verdampfung gesprochen. Wenn nur der entstehende Dampf in dem angrenzenden Raum vorhanden ist, entspricht der Gesamtdruck dem Teildruck dieses Dampfes [45]. Die Trocknung unter Vakuum ist ein Beispiel hierzu.

Die Abführung des entstehenden Dampfes, der in Abbildung 3.1 genannten Dampfbewegung, kann durch zwei verschiedene Vorgänge erfolgen:

- Dampfdiffusion: Der entstehende Dampf zerstreut sich in einem anderen Gas, welches bei seiner Bewegung den aufgenommenen Dampf ansammelt,
- Dampfströmung: Dabei wird nur der entstehende Dampf ohne die Mitwirkung von anderen Stoffen abgeführt.

Bei der Dampfdiffusion verbreitet sich der entstehende Dampf in einem so genannte „Trägergas“. Die Teildruckunterschiede des Dampfes sind die treibenden Kräfte für die Bewegung des Dampfes in diesem Gas. Dieser Trocknungsvorgang wird Verdunstungstrocknung genannt [68].

Bei einer Dampfströmungsbewegung ist der Gesamtdruckunterschied die treibende Kraft zur Überwindung von Reibung. Dampfströmungen dieser Art werden auch mit dem Begriff Verdampfungstrocknung bezeichnet [39].

Stoffbewegung und Wärmetransport sind eng miteinander verknüpft. Bei dem Wärmetransport spielt die Temperatur des Prozesses eine wichtige Rolle, während bei der Stoffbewegung der Dampfdruck dominant ist.

### 3.3 Wasseranteile und ihre Bindungsarten

Die Wasseranteile sowie ihre Bindungsarten unterscheiden sich je nach Art des Substrates. Ihre Klassifikation hat eine große Bedeutung zur Auslegung und Auswahl des Trockners sowie der Vorbereitung und der Durchführung des Trocknungsprozesses. Daten wie Energieaufwand, Prozessdauer und Trocknungsverlauf können durch Erkenntnisse solcher Eigenschaften kalkuliert und optimiert werden.

Es gibt umfangreiche Literatur mit unterschiedlicher Zuordnung von Wasseranteilen und Flüssigkeitsbindung, wobei die jeweilige Zuordnung meist abhängig von dem Forschungsbereich ist. Die getrennte Erfassung jeder der unten erwähnten Bindungen ist nicht messbar oder wirtschaftlich nicht von Interesse. Ähnliche Arten der Bindung, die für die Forschung wichtig sind, werden in den nächsten Unterkapiteln kombiniert vorgestellt.



### 3.3.1 Wasseranteile im Substrat

Die Abbildung 3.2 stellt die verschiedenen Wasseranteile grafisch dar.

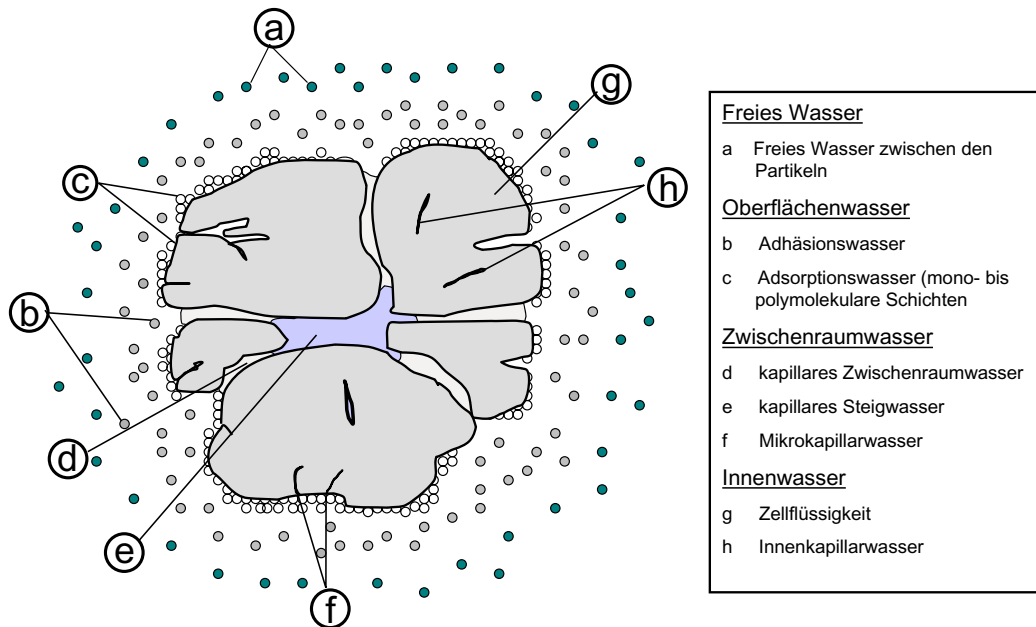


Abbildung 3.2: Wasseranteile an einem Partikel [34], [25]

Das *freie Wasser* ist das ungebundene, nicht durch Oberflächenkräfte beeinflusste Wasser, das sich zwischen den Feststoffpartikeln bewegt. Es kann mechanisch leicht vom Feststoff getrennt werden (z.B. durch Abpressen).

Das *Adhäsionswasser* bildet sich auf der äußeren Oberfläche des Substrates. Es ist ein Flüssigkeitsfilm über der Adsorptionsschicht und verfügt über eine geringe Bindungsintensität.

Das *Adsorptionswasser* ist eine Schicht mit hoher Bindungsintensität, die sich kaum mechanisch entfernen lässt. Adhäsionswasser und Adsorptionswasser werden auch als Oberflächenwasser bezeichnet [34].

Das *Zwischenraumwasser* wird während der Trocknung durch Kapillarkräfte an die Partikeloberfläche befördert. Das Material zeigt ein hygroskopisches Verhalten, wenn der Dampfdruck der Kapillarflüssigkeit geringer ist als der Sättigungsdruck der Umgebung.

Bei dem Zwischenraumwasser kann noch eine weitere Unterteilung in kapillares Zwischenraumwasser, kapillares Steigwasser und Mikrokapillarwasser unternommen werden (Abbildung 3.2).

*Innenwasser* ist chemisch so stark an den Feststoff gebunden, dass es nur oberhalb der Zersetzungstemperatur entzogen werden kann. Meistens wird dieser Vorgang nicht mehr als Trocknung bezeichnet [18]. Er umfasst Zellflüssigkeit und Innenkapillarwasser.

### 3.3.2 Bindungsformen an das Substrat

Feuchtgut enthält Flüssigkeit. Diese ist entweder als reine Flüssigkeit oder als Salzlösung vorhanden. Wasser ist in den meisten Fällen der Hauptbestandteil einer Flüssigkeit [18].

Das Wasser kann dem Feuchtsubstrat nur durch Zerstörung der Feuchtigkeitsbindung an das Substrat entzogen werden. Je stärker diese Bindung ist, desto größer ist die erforderliche Energie. Um eine optimale Auslegung der Trocknungsprozesse zu erreichen, ist die Kenntnis der Bindungsarten von großer Bedeutung.

Die Definition der Bindungsformen zwischen Feststoffen und Flüssigkeiten werden im Folgenden kurz dargestellt.

#### Chemisch gebundenes Wasser

Die chemische Bindung, die auch Kristallwasser bezeichnet wird, weist die stärkste Bindungsart auf, die auch durch Trocknung bei 105°C nicht zu überwinden ist. Dieses angelagerte Wasser wird nur bei hoher Temperatur entzogen (z.B. in Zement durch Glühen bei 1000°C). Kristallwasserhaltige Substanzen werden auch als Hydrate bezeichnet. Bei der Bildung dieser Hydrate wird Energie in Form von Hydratationswärme frei.

In quantitativer Hinsicht ist chemisch gebundenes Wasser am Substrat vernachlässigbar [76]. Der erhöhte Bedarf an Energie, die nötig ist, um diese Bindung zu zerstören, ist wirtschaftlich uninteressant, aufgrund dessen wird sie im Folgenden nicht näher beachtet.

## Physikalisch-chemische Bindung

Der Verlauf der Flüssigkeitsaufnahme wird hier in zwei Bindungsmechanismen unterteilt:

- **Adsorptive Bindung:** Dies stellt die erste Phase der Flüssigkeitsaufnahme dar, bei der Bindungswärme frei wird. Während eine Kontraktion (Verdichtung) des Systems Feststoff-Flüssigkeit bei der Trocknung erfolgt, wird der Feststoff mit der Befeuchtung größer. Es ist auch zu beachten, dass das Gesamtvolumen von Substrat und Flüssigkeit kleiner ist als die Summe der Einzelvolumina. Die wirksam werdenden adsorptiven Kräfte sind Van der Waal'sche und Coulomb'sche Kräfte.
- **Osmotische und strukturelle Bindungen:** Im Gegensatz zur adsorptiven Bindung wird in dieser zweiten Phase keine Wärme freigesetzt [47]. Die Wasseraufnahme der Zellen findet durch eine semipermeable Membran statt. Zellinnenwasser ist z.B. osmotisch gebundenes Wasser.

Adsorptive, osmotische und strukturelle Bindungen werden aufgrund der Schwierigkeit, jede von ihnen separat zu messen, zusammen als gebundener Wasseranteil bezeichnet [34].

Tabelle 3.1 stellt die benötigte Energie zur Zerstörung der Strukturen von chemischen und physikalischen Bindungen dar.

Tabelle 3.1: Enthalpie in verschiedenen Bindungsformen [28], [75], [34]

	Chemisch		Physikalisch			Mechanisch		
BINDUNGS-ART	ionisch	molekular	adsorptiv	osmotisch	strukturell	mikro-kapillar	makro-kapillar	nicht gebunden
Bindungs-enthalpie [kJ/kmol]	-	5000	3000	-	-	$\geq 100$	$\leq 100$	0
[kJ/kg]	-	280	170	-	-	$\geq 5,5$	$\leq 5,5$	0

## Physikalisch-mechanische Bindung

Physikalisch-mechanisch gebunden sind die Kapillarflüssigkeit (Mikro- und Makrokapillaren), die grobe Oberflächenflüssigkeit und auch die Adhäsionsflüssigkeit, die ein Substrat enthält.

Adhäsion ist die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Molekülen von eng miteinander in Berührung stehenden Körpern, während Kohäsion die Wechselwirkung zwischen gleichartigen Molekülen ist. Das bedeutet, dass im Adhäsionsprozess eine Anziehung der Atome eines Festkörpers stattfindet, bei Kohäsion dagegen eine Anziehung anderer Flüssigkeitsmoleküle. Die Adhäsionsflüssigkeit ist eine dünne Schicht von Wassermolekülen, die sich über dem Adsorptionswasser befindet.

Mit Hilfe der Abbildung 3.3 kann festgestellt werden, dass der Punkt A unter Einwirkung von drei Oberflächenspannungen steht [47]:

- (1)  $\sigma_{1,2}$ : Oberflächenspannung des festen Körpers gegen die Flüssigkeit
- (2)  $\sigma_{2,3}$ : Oberflächenspannung der Flüssigkeit gegen ihren gesättigten Dampf
- (3)  $\sigma_{1,3}$ : Oberflächenspannung des festen Körpers gegen den umgebenden Dampf

Im Gleichgewichtszustand des Systems bleibt der Grad der Benetzung des Körpers durch eine Flüssigkeit erhalten. Der Benetzungswinkel  $\varphi$  ist durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\cos \varphi = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{1,2}}{\sigma_{2,3}} \quad (3.1)$$

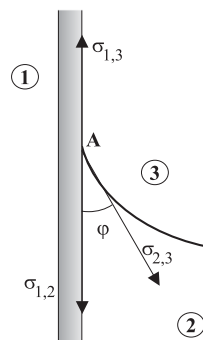


Abbildung 3.3: Kräfte, die die Oberflächenspannung bewirken [47]

Erweisen sich die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte, wird in der Flüssigkeitsoberfläche eine konkave Krümmung ( $\varphi < 90^\circ$ ) erzeugt. Es entsteht unter dieser Wirkung ein Unterdruck in der gefüllten Kapillare, die das Kapillarwasser nach oben zieht. Durch die Oberflächenspannung wirkt das Kapillarwasser benetzend auf die Oberfläche der Kapillare (Kapillarattraktion), durch einen so genannten Kapillarsog. Dieser Sog führt dazu, dass das in den Kapillaren enthaltene Wasser zur Substratoberfläche aszendiert wird und dort verdunsten kann.

Je kleiner der Porenradius eines Feststoffes ist, in denen eine Flüssigkeit haftet, desto stärker sind die kapillaren Zugkräfte und folglich die Steighöhe über der Flüssigkeit. Im Bereich der kapillaren Steighöhe sind alle Poren innerhalb der und zwischen den Partikeln wassergefüllt [34], [47].

Die Steighöhe  $h$  der Flüssigkeit in der Kapillare ist mit der Gleichung 3.2 zu berechnen, wenn der hydrostatische Druck gleich dem Kapillardruck gesetzt wird [47].

$$h = \frac{2 \cdot \sigma_W \cdot \cos \varphi}{r' \cdot g \cdot (\rho_W - \rho_D)} \quad (3.2)$$

mit:

$h$ :	kapillare Steighöhe in cm
$\sigma_W$ :	Oberflächenspannung (Wasser bei 20 °C) in g / s <sup>2</sup>
$\cos \varphi$ :	Benetzungswinkel in °
$\rho_W$ :	Dichte der Flüssigkeit in g / cm <sup>3</sup>
$\rho_D$ :	Dichte des Dampfes in g / cm <sup>3</sup>
$g$ :	Erdbeschleunigung in cm / s <sup>2</sup>
$r'$ :	Radius der Kapillare in cm

Sind die Kapillaren klein, dann entspricht der Meniskusradius  $r$  dem Kapillarradius  $r'$ . Die Dichte des Dampfes kann im Vergleich mit dem Ausmaß der Dichte der Flüssigkeit vernachlässigt werden.

Die gespeicherte potenzielle Energie  $E$  (Bindungsenthalpie) ist das Produkt von kapillarer Steighöhe ( $h$ ) und Erdbeschleunigung ( $g$ ).

### 3.3.3 Energieaufwand zum Überwinden der Wasserbindungskräfte

Um den Energieaufwand eines Trocknungsprozesses und den Trocknungsverlauf zu bestimmen, muss die Bindungsenthalpie zwischen Feststoff und Flüssigkeit bekannt sein. Die Energiemenge, die benötigt wird, um diese Bindung zu überwinden, kann entweder empirisch oder mathematisch ermittelt werden.

Die Bindungsenergie des Wassers im Feststoff hängt nicht nur von der Art der Bindung, sondern auch von der Temperatur ab. Die Oberflächenspannung ( $\sigma_t$ ) einer Flüssigkeit reduziert sich mit der Zunahme der Temperatur ( $t$ ). Für Wasser lautet diese Beziehung [47]:

$$\sigma_t = 75,7 \cdot (1 - 0,0020 \cdot t) \quad (3.3)$$

mit:

$t$  = Temperatur in °C und  $\sigma_t$  in erg/cm<sup>2</sup>, was  $10^{-10}$  kJ/cm<sup>2</sup> entspricht.

In der Flüssigkeits-Dampf-Phase kann eine Druckänderung nur durch eine Temperaturänderung erzeugt werden [71]. Es reicht also aus, den Temperatureinfluss zu kennen.

Die Werte in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 verdeutlichen, dass mehr Energie benötigt wird, um physikalische und chemische Bindungen zu zerstören, als bei mechanischen Bindungen.

Eine Klassifikation der Feuchtigkeitsbindungen an Klärschlamm, die die drei Bindungsformen berücksichtigt, ist in Tabelle 3.3 zu finden.

Falls der Radius der Kapillaren größer als  $10^{-6}$  m ist und die benötigte Energie zum Entzug des Feuchtanteils gleich der Verdampfungswärme ist, wird der Dampfdruck der Feuchte nicht beeinflusst. Dann kann die benötigte Wärmeenergie wie folgt berechnet werden:

$$Q_W = m_{tr} \cdot (x_{ein} - x_{aus}) \cdot h_v \quad (3.4)$$

mit:

- $Q_W$ :: zur Verdampfung aufgewendete Wärmeenergie [kJ]
- $m_{tr}$ :: Trockenmasse des Produktes [kg]
- $x_{ein}$ :: Anfangs-, bzw. Eintrittsfeuchte [ $kg_{Wasser}/kg_{TS}$ ]
- $x_{aus}$ :: End-, bzw. Austrittsfeuchte [ $kg_{Wasser}/kg_{TS}$ ]
- $h_v$ :: Verdampfungsenthalpie [kJ/kg<sub>TS</sub>]

Tabelle 3.2: Enthalpiebedarf zum Trennen von Bindungen und Assoziationen [42]

Enthalpiebedarf	kJ/kmol
zum Spalten von kovalenten (chemischen) Verbindungen und von Ion-Ion-Assoziationen	150000 - 1100000
zum Zerlegen von flüssigem Wasser in seine atomaren gasförmigen Bestandteile H <sub>2</sub> und O <sub>2</sub>	286500
zum Verdampfen von flüssigem Wasser bei 273 K (Zerbrechen der Wasserstoffbrücken zwischen den Molekülen), Verdampfungs-enthalpie	45040
zum Trennen adsorbierten Wassers von Cellulose und Überführen in freies Wasser (gerechnet ab 273 K)	21125
zum Zerbrechen von Wasserstoffbrücken zwischen Molekülen gleicher oder verschiedener Art (allg.)	20000 - 40000
zum Schmelzen von Eis (Niederbrechen von Wasserstoffbrücken an Eiskristallen), Schmelzenthalpie	6036
zum Trennen der Dipol-Dipol-Assoziate	2000 - 10000
zum Trennen der van der Waals-Assoziate	800 - 5000

Tabelle 3.3: Feuchtigkeitsbindungen am Substrat [47]

Art der Bindung	I. Chemische Bindung		II. Physikalisch-chemische Bindung (Bindung in verschiedenen, nicht streng bestimmten quantitativen Verhältnissen)				III. Mechanische Bindung (Festhalten des Wasser in beliebigen Gewichtsverhältnissen)		
	Ionenbindung	Molekulare Bindung (Hydratwasser)	Adsorptive Bindung	Feuchtigkeitsadsorption	Osmotische Bindung	Strukturbindung	Bindung in Mikrokapillaren	Bindung in Makrokapillaren	Bindung durch Benetzen
Ursprung der Feuchtigkeitsbindung	Chemische Reaktionen (Hydratation)	Kristallisation aus einer Lösung (Bildung von Kristallhydraten)	Lösung in Wasser, Grenzschichtadsorption der Feuchtigkeit durch Moleküle und Ionen, Bildung von Solvathüllen	Feuchtigkeitsadsorption	Selektive Diffusion durch semipermeable Wände	Gelbildung	Aufnahme von Wasser aus feuchter Luft oder durch unmittelbare Berührung	Aufnahme von Wasser durch unmittelbare Berührung in durchgehenden Kapillaren	Adhäsion des Wasser bei unmittelbarer Berührung mit der Oberfläche des Körpers
Bindungskräfte	Primäre Valenz (elektrostatische Kräfte)	Sekundäre Valenzen	alle Moleküle	Molekulares Kraftfeld der Moleküle und Mizellen der äußeren und inneren Oberfläche	Osmotischer Druck	Das Wasser wird bei der Bildung des Gels aufgenommen	Kapillardruck, durch Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche bedingt	Dasselbe	Die Oberflächenspannung wird durch einen Benetzungswinkel $0 < 90^\circ$ gekennzeichnet
Beispiele von Stoffen, die die gegebene Bindungsform aufweisen	$\text{Ca}^{2+}=\text{O}^{2-} + \begin{array}{c} \text{OH} \\   \\ \text{H}^+ \end{array} \rightarrow \begin{array}{c} \text{OH} \\   \\ \text{Ca} \\   \\ \text{OH} \end{array}$	$\text{CuSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$	Stoffe, die ionendisperse oder molekulardispers eine wässrige Lösungen bilden	Hydro(lyo)-phile Stoffe	Pflanzliche Zellen mit konzentrierter Lösung, in die das Wasser aus einer dünneren Lösung (Umgebung) eindringt	Gallerbildende Stoffe (1% feste Phase + 99% Wasser)	Körper mit Kapillaren $< 10^{-5}$ cm	Körper mit Kapillaren $> 10^{-5}$ cm	Benetzbare (hydrophile) Körper
Intensität (Energie) der Bindung	Sehr starke Bindung	Starke Bindung	nicht umkehrbare	schwer umkehrbare	Bindung mittlerer Intensität	umkehrbare	Mechanisches Festhalten von Wasser (die Schicht an den Wandungen ist adsorptiv gebunden)	Mechanisches Festhalten von Wasser (die Feuchtigkeitschicht ist an der Gutoberfläche adsorptiv gebunden)	Mechanisches Festhalten von Wasser (die Feuchtigkeitschicht ist an der Gutoberfläche adsorptiv gebunden)
Bedingungen zur Aufhebung der Bindung	Chemische Einwirkung, manchmal Glühen	Glühen	Verdunstung	Desorption	Desadsorption	Verdampfung, Ausdrücken der Feuchte unter Druck unter Zerstörung der Struktur	Druck, der den Kapillarsog übersteigt	Mechanisches Entwässerungsverfahren	Mechanisches Entwässerungsverfahren
Veränderung des Stoffes und des Wassers durch die Feuchtigkeitsbindung	Bildung eines neuen Stoffes. Das Wasser verschwindet als solches und wird Bestandteil des neuen Stoffes	Der Stoff verändert seine Eigenschaften erheblich. Das Wasser tritt in die Kristallstruktur ein	Stoff dispergiert spontan bis zu Ionen oder Molekülen, da die Energie der Solvatbildung die Adhäsionskräfte des Stoffes übersteigt	Stoff ändert seine Eigenschaften, wird plastisch. Das Wasser wirkt als Weichmacher. Das Gut quillt, da Wasser als Dispersionsmittel in die intermizellaren Räume tritt. Im Grenzzustand bildet sich ein Kolloid. Das Wasser verändert seine Eigenschaften	Quellung des Stoffes	Der Stoff verändert seine Eigenschaften, es wird ein quasi fester Körper gebildet. Das Wasser wird strukturell im Stoff fixiert. Es nimmt andere Eigenschaften an	Die Hauptmenge des Wassers ist frei beweglich und behält ihre Eigenschaften. Die Eigenschaften der adsorptiv gebundenen Wasserschicht ändern sich. Der Stoff behält seine grundlegenden Eigenschaften, einige werden im Zusammenhang mit der adsorptiven Bindung eines Teils des Wassers verändert		



## 3.4 Thermodynamik der Trocknung

Die Befeuchtung eines Substrates ist ein irreversibler Vorgang mit Entropiezunahme, bei dem Bindungskräfte verschiedenster Art abgesättigt werden. Die Trocknung ist die Umkehrung der Befeuchtung. Energie wird zugeführt um die Bindungskräfte zu überwinden. Diese Energie wird entweder mechanisch oder thermisch eingetragen.

Es wäre theoretisch zum Entzug des Wassers aus dem Feuchtgut keine Arbeit notwendig, weder mechanische noch thermische, wenn die Flüssigkeit ungebunden als freies Wasser im Substrat vorliegen würde. Treten aber Oberflächenspannungen auf, was immer der Fall ist, ist Energie zu ihrem Entzug notwendig.

Die Bindungskräfte werden mit zunehmender Trocknung, d.h. mit abnehmender Feuchte stärker [39]. Die Wärmeleitfähigkeit des Substrates ist ebenfalls von seinem Feuchtegehalt abhängig und senkt sich bei geringer Substratfeuchte ab.

Im Folgenden werden die drei verschiedenen Arten von Wärmeübertragung beschrieben, die während eines Trocknungsprozesses stattfinden können. Hierbei werden die Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der Wärmemenge ( $Q_{Total}$ ), den verschiedenen Formen des Wärmeverlustes an die Umgebung durch Wärmeleitung ( $Q_L$ ), Konvektion ( $Q_K$ ) und Strahlung bzw. Radiation ( $Q_R$ ), sowie durch Erwärmung des Substrates ( $Q_S$ ) vorgestellt. Der Zusammenhang dieser Komponenten wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Q_{Total} = Q_L + Q_K + Q_R + Q_S + Q_W \quad (3.5)$$

$Q_W$  entspricht der Wärmeenergie, die benötigt wird, um Wasser zu verdampfen.

### 3.4.1 Wärmeübertragung bei der Trocknung

In der Thermodynamik ist Wärme eine Vorgangs- oder Prozessgröße und bezeichnet die Energie, die zwischen einem System und seiner Umgebung nur bedingt durch einen Temperaturunterschied übertragen wird. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik fließt dabei Wärme stets in Richtung fallender thermodynamischer Temperatur über die Systemgrenze [21].

Die Wärmeübertragung bestimmt, neben der treibenden Temperaturdifferenz, jedoch noch viele andere Größen, wie z.B. thermophysikalische Stoffdaten, Abmessungen und Form, Bewegung sowie Strömungszustand des betrachteten Systems. Dabei können drei Arten des Wärmetransports unterschieden werden:

- Wärmeleitung,
- konvektiver Wärmeübergang,
- Wärmestrahlung.

In dem folgenden Abschnitt werden die Grundzüge behandelt, die für die Trocknungstechnik von besonderem Nutzen sind.

Bei realen Systemen erfolgt meistens eine Kombination von mehreren Übertragungsarten. Innerhalb von Festkörpern findet nur Wärmeleitung statt, in Flüssigkeiten und Gasen Konvektion. Wärmestrahlung findet hauptsächlich zwischen Oberflächen (auch im Vakuum) statt. Als Beispiel für ein in Kombination arbeitendes System kann ein poriges Material, das häufigste Objekt der Trocknungstechnik, genannt werden. Es finden zwischen den Luftporen Strahlungsemissionen statt. Bei feuchtem Material, das Feststoff, Flüssigkeit und in den Poren ein Dampf-Luftgemisch enthält, kommt noch ein Energietransport durch in Richtung des Temperaturgefälles diffundierenden Dampf hinzu. So gibt es in solchem Material Einflüsse in der Leitfähigkeit durch die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung und den konvektiven Wärmeübergang [39].

Krischer [39] betrachtet bei trockenen porigen Stoffen auch andere Eigenschaften, die die Wärmeübertragung beeinflussen können. Diese sind Porosität und Verbindung/Kontaktflächen der Teilchen, Temperatur und Druck. In Feststoffteilchen ist die Wärmeleitung abhängig von der physikalisch-chemischen Struktur des Stoffes. Bei porigen Stoffen von geringer Porosität und guter Verkittung der Einzelteilchen wächst z.B. die Wärmeleitung mit der Temperatur. In der Porenluft nimmt die Wärmeübertragung mit steigender Temperatur und wachsender Porengröße zu (infolge der Strahlung). Theoretische Berechnungen sowie experimentelle Versuche mit porigen Stoffen haben ergeben, dass die Wärmeleitfähigkeit bei Drücken in der Nähe des Atmosphärendrucks kaum vom Druck abhängig ist. Als Voraussetzung dafür gilt, dass die Porengröße im Vergleich zur mittleren freien Weglänge der Luftmoleküle groß ist. Bei sehr niedrigen Drücken ( $<10^{-5}$  bar), die nur durch Strahlungsaustausch in den Poren und durch Feststoffleitung bedingt sind, ist dies ebenfalls der Fall. Im Vakuum ist die strahlungsbedingte Leitfähigkeit um so niedriger, je feiner die Korngröße ist [39].

### **Wärmeleitung (Kontakt Trocknung)**

Wärmeleitung ist der Energietransport benachbarter Moleküle aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten [21].

In dem Trocknungsprozess durch Wärmeleitung, der auch als Kontakttrocknung bekannt ist, befindet sich das Substrat in unmittelbarer Berührung mit beheizten Flächen, ohne in direkten Kontakt mit den Wärmeträgern zu treten (Indirekttrocknung).

Der zeitabhängige Wärmestrom ( $Q_L$ ) wird durch Gleichung 3.6 beschrieben, wobei  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit, des von der Wärme durchströmten Stoffes,  $dT$  der Temperaturgradient und  $A$  die isotherme Fläche ist [88]. Dies ist auch als Fouriersches Grundgesetz der Wärmeleitung im Beharrungszustand bekannt [39].

$$Q_L = \lambda \cdot A \cdot dT \quad (3.6)$$

Die Wärmeleitfähigkeit (SI-Einheit W/K·m) gehört zu den wichtigsten Materialeigenschaften bei der Wärmeübertragung. Sie hängt von der Temperatur und dem Druck ab. Ihre Druckabhängigkeit braucht jedoch nur bei Gasen und Flüssigkeiten beachtet zu werden [21].

In dem Temperaturbereich, der für die Trocknungstechnik relevant ist, ändert sich die Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen besonders stark [40]. Die Wärmeleitung in feuchtem Gut ist so groß, dass die in diesen Zustand ermittelte Wärmeleitung nicht repräsentativ für den Gesamtvorgang ist. Deswegen ist es wichtiger, die Wärmeleitzahl von dem trockenen Stoff zu kennen, als den des feuchten Stoffes [39]. Abfall ist ein sehr inhomogenes Stoffgemisch, dessen Zusammensetzung und Struktur von regionalen und zeitlichen (saisonalen) Schwankungen unterliegt. Deswegen ist es schwierig dessen Wärmeleitfähigkeit zu bestimmen und die Wärmeleitung mathematisch zu berechnen.

Es gibt bestimmte Einflussgrößen, die die effektive Wärmeleitfähigkeit eines Materials determinieren. In dem Fall von Haufwerk zitiert Tsotsas [84] als wichtigste Größen Stoffzusammensetzung, Porosität sowie Wärmeleitfähigkeiten der Feststoffe und Fluide. Nur sekundären Einfluss haben die Temperatur, der Druck, die Partikelgröße und deren Verteilung. Um die Wärmeleitzahl eines Haufwerks zu bestimmen, stehen verschiedene physikalische sowie empirische Modelltypen in der Literatur zur Verfügung.

Zur Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten von Pulvern und Schüttungen stellt Roth [64] experimentelle Methoden mittels instationärer Verfahren vor.

Empirische Modelle von Kranert [37], die Schlammkomposte mit Wassergehalten zwischen 19,7 und 59,6 Gew.-% untersucht haben, erreichten Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,053 und 0,175 W/m·K unter Temperaturvariationen von 5°C bis 25°C.

Eine empirische Formel zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von kompostiertem Hausmüll wurde von Moreno [48] erstellt.

Singley [74] ermittelte bei mit Stroh vermischten Schweineabfällen mit Wassergehalten von 10 bis 50 Gew.-% einen linearen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von 0,28 bis 0,44 W/m·K.

Ein physikalisches Modell für MBA Abfälle nach der Ablagerung auf einer Deponie wurde von Dach [9] erstellt. Um die berechneten Wärmeleitzahlen dieses Modells zu überprüfen, führte er Versuche durch. Vier Abfallfraktionen wurden betrachtet (Tabelle 3.4). Damit konnte z.B. für einen Sättigungsgrad von 40% und bei einer Temperatur von 30°C ein Wertebereich von ca. 0,2 bis 0,75 W/m·K gezeigt werden.

Tabelle 3.4: Wärmeleitfähigkeiten der Feststoffe bei porenfreier Stoffdichte [9]

Fraktion	$\lambda$ [W/m·K]
Native Organik	0,2 – 0,3
Kunststoffe	0,13 – 0,4
Mineralischer Anteil	1,5 – 5,5
Fe-Metalle	460 – 540

Einer Übertragbarkeit der erwähnten Daten auf das in dieser Arbeit verwendete Substrat ist nicht möglich, da die Zusammensetzung sowie die Dichten des Materials beachtlich von den hier genannten Werten abweichen. Unter Beachtung der Tabellen 3.4 und 3.5 kann angenommen werden, dass der Wert sehr klein ist [20], vermutlich kleiner als 0,2 W/m·K, weil die in dieser Arbeit untersuchten Substrate nur mechanisch vorbehandelt wurden und einen größeren Luftporenraum mit einer Beeinträchtigung der Wärmeleitung aufweisen.

Der Trocknungsverlauf bei Kontakttrocknung wird im Abschnitt 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe bei 20 und 100 KPa [21], [53]

Stoff	$\lambda$ [W/m·K]
Wasser	0,6
Luft	0,0257
Fett	0,16
Kork	0,041
Tannenholz	0,13
Erdreich (grobkiesig)	0,52
Sand	0,27
Papier	0,12

### Konvektionstrocknung

Konvektiver Wärmeübergang erfolgt wenn Energie durch die makroskopische Bewegung des Fluids transportiert wird.

Bei der Konvektionstrocknung erfolgt die Wärmezufuhr zum Substrat über heißes Gas, zumeist Luft, das zweierlei Funktionen erfüllt. Zum einen wird die Wärme vom Gas auf das Substrat übertragen, so dass die Feuchtigkeit verdampft, zum anderen kann der entstehende Dampf vom Wärmeträger wieder aufgenommen und abtransportiert werden. Es handelt sich hier um eine Direkttrocknung, wobei die Wärmeträger in direktem Kontakt mit dem Substrat stehen. In der Praxis ist die Konvektionstrocknung die häufigste Trocknungsart.

Informationen über den Trocknungsverlauf bei der Konvektionstrocknung sind in Abschnitt 3.5 aufgeführt.

Der Wärmestrom  $Q_K$  von einem bewegten Fluid (Flüssigkeit oder Gas) mit mittlerer Temperatur  $T_{Fl}$  an einer festen Wand mit Temperatur  $T_W$  ist bei konstanter Temperatur definiert als [21]:

$$Q_K = \alpha \cdot A \cdot (T_{Fl} - T_W) \quad (3.7)$$

mit:

$\alpha$ : Wärmeübergangskoeffizient in W/m<sup>2</sup>·K

A: Fläche in m<sup>2</sup>

Es entsteht eine freie Konvektion, wenn die Strömung und damit die Grenzschicht

durch die Temperatur selbst erzeugt werden. Werden die Grenzschichtbildungen durch z.B. Pumpen, Ventilatoren oder Verdichter erzeugt, handelt es sich um eine erzwungene Konvektion.

Alle Gleichungen die nötig sind, um diesen Wärmeübergangskoeffizienten für die beiden oben genannten Fälle von freier und erzwungener Konvektion zu berechnen, sind im Cerbe [7] aufgeführt.

### Strahlungstrocknung (Radiation)

Die Wärmeübertragung durch Strahlung ist im Gegensatz zur Wärmeleitung und des konvektiven Wärmeüberganges nicht an Materie gebunden. Elektromagnetische Wellen übertragen Energie auch durch den leeren Raum [21].

Alle Körper geben kontinuierlich Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab und nehmen stetig Strahlung auf. Treffen elektromagnetische Wellen auf einen Widerstand, zum Beispiel ein Trocknungssubstrat, so werden sie zum Teil reflektiert, also in den Raum zurückgeworfen, teilweise werden sie ungehindert durchgelassen oder sie geben ihre Energie an die Atome des Trocknungsgutes ab und versetzen die Atome dadurch in schnellere, ungeordnete Schwingungen. Daraus resultiert die Erwärmung des Substrates. Diese Tatsache wird in der Trocknungstechnik genutzt.

Bei der Strahlungstrocknung ist kein Übertragungsmedium wie z.B. Luft zum Wärmeübergang nötig. Allerdings muss der Abtransport der frei werdenden Trocknungsdämpfe durch ein Medium realisiert werden. Die Energie geht von einem Strahler aus und wird über einen Reflektor auf das Substrat übertragen. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz und dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre sind bei konstanter Temperatur die Emission und die Absorption stets gleich groß.

Die Intensität der Wärmestrahlung ist bei verschiedenen Wellenlängen sehr unterschiedlich und nimmt mit der Temperatur des strahlenden Körpers in hohem Maße zu [22].

In der Trocknungstechnik wird häufig die Infrarotstrahlung eingesetzt, da sie ein günstiges Spektrum (Wellenbereich) aufweist. Der Wärmestrom durch Strahlung  $Q_R$  wird durch das Stefan-Bolzmannsche Gesetz berechnet:

$$Q_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.8)$$

mit:

$\sigma$ :	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ als Stefan-Boltzmann-Konstante
$\varepsilon$ :	Emissionsverhältnis des Körpers $[-]$
$A$ :	strahlende Fläche $[\text{m}^2]$
$T_1$ :	Temperatur des Strahlers $[\text{K}]$
$T_2$ :	Temperatur der Gutoberfläche $[\text{K}]$

### 3.4.2 Die Erwärmung des Substrates

Experimentell kann festgestellt werden, dass zur Erwärmung von  $m$  kg eines beliebigen homogenen Stoffes von der Temperatur  $T_1$  auf die Temperatur  $T_2$  die Wärmemenge

$$\Delta Q_S = c \cdot m \cdot (T_2 - T_1) = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (3.9)$$

erforderlich ist, sofern keine Umwandlung des Aggregatzustandes erfolgt. Die Konstante  $c[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$  ist die spezifische Wärme des betreffenden Stoffes. Es gilt somit:

$$\text{spezifische Wärme} = \frac{\text{zugeführte Wärme}}{\text{Masse} \cdot \text{Temperaturänderung}} \quad (3.10)$$

Häufig wird der Begriff Wärmekapazität  $C$  verwendet, ein Begriff aus der Thermodynamik, der die Fähigkeit eines Körpers, Energie in Form von thermischer Energie zu speichern, bezeichnet. Die Wärmekapazität  $C$  beschreibt die Wärmemenge  $Q$ , die benötigt wird, um in einem Körper einen Anstieg der Temperatur um  $1\text{K}$  zu erhalten.

Der Zusammenhang zwischen Wärmekapazität und spezifischer Energie ist:

$$\text{Wärmekapazität} = \text{spezifische Wärme des Körpers} \cdot \text{Masse} = c \cdot m \quad (3.11)$$

Kranert [36] verdeutlicht in Abbildung 3.4 den Zusammenhang zwischen der spezifischen Wärme eines Restmülls und dem Wassergehalt. Durch Kenntnis dieser Information kann die Menge an thermischer Energie zur Erwärmung des untersuchten Substrates berechnet werden.

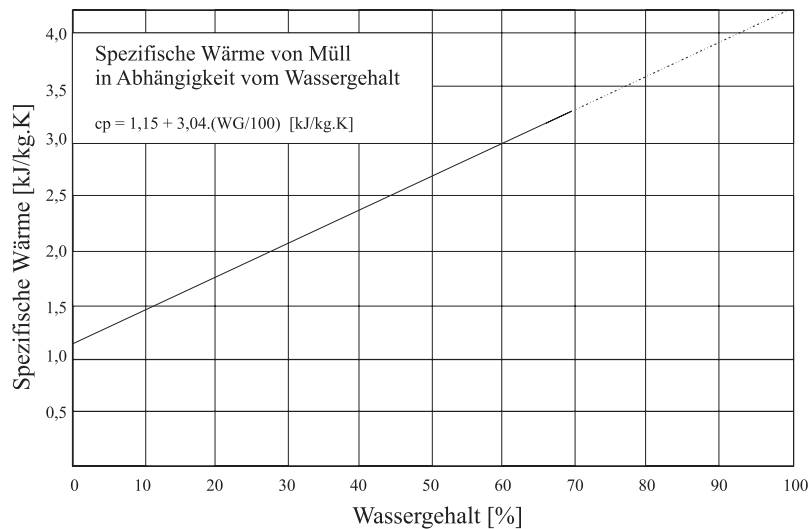


Abbildung 3.4: Spezifische Wärme von Müll in Abhängigkeit vom Wassergehalt [36]

### 3.5 Trocknungsverlauf und Trocknungsabschnitte

Der Trocknungsverlauf wird von der Art des Wärme-, Dampf- und Flüssigkeitstransportes im Substrat bestimmt und hängt von den Stoffeigenschaften des Substrates ab. Es wurde schon am Anfang des Kapitels 3 (siehe Abbildung 3.1) die Bedeutung der Kopplung zwischen den drei oben genannten Transportarten erwähnt, um den Trocknungsprozess selbst zu behandeln. Anhand des charakteristischen Verlaufs der Trocknungskurve eines Substrates lassen sich Aussagen über die verschiedenen Wasseranteile (Abschnitt 3.3), die in diesem Substrat vorliegen, treffen.

Die grafische Darstellung des Trocknungsverlaufes kann entweder durch das Massenverhältnis  $m$  bzw. die Trocknungsrate gegen die Trocknungszeit  $t$  oder die Trocknungsgeschwindigkeit  $v$  gegen das Massenverhältnis  $m$  aufgetragen werden. Das Massenverhältnis  $m$  ist der Quotient aus der Wassermasse  $m_{Wasser}$  und der Trockenmasse  $m_{TS}$  eines Trocknungsgutes und entspricht der Substratfeuchte [18], [34].

Die Darstellungsvarianten der Trocknungskurve sowie die Charakterisierung der einzelnen Abschnitte der Kurven, die im Folgenden erläutert werden, sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

Eine Trocknungskurve muss auf empirischem Wege bestimmt werden, da die kapillare Leitfähigkeit eines Substrates stark von der spezifischen Feuchte abhängt, wie schon in Abschnitt 3.4.1 erläutert. Die Trocknungskurve ist daher nicht durch Bestimmung der kapillaren Leitfähigkeit konstruierbar.



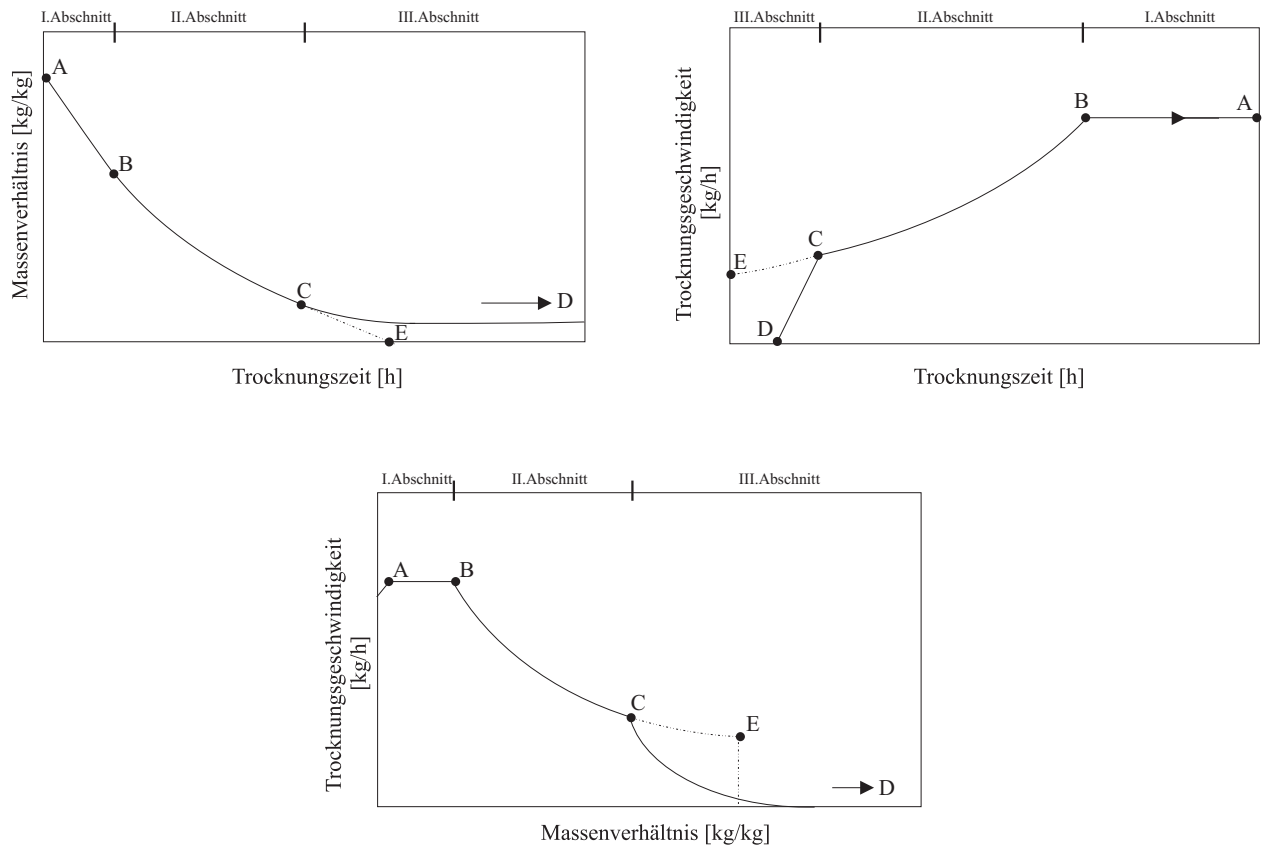


Abbildung 3.5: Trocknungsverlauf (ausgezogene Linien beschreiben die Trocknung eines hygroskopischen Gutes, die gestrichelten die eines nichthygroskopischen Gutes)

Der Trocknungsverlauf wird in der Regel in drei Abschnitte unterteilt. In der Literatur wird meistens die Trocknungskurve für den Fall einer Konvektionstrocknung beschrieben, da sie in der Praxis am häufigsten und längsten als Verfahren eingesetzt wird. Da in dieser Arbeit eine Kontaktstrocknung durch Umwälzung des Substrates erforscht wurde, ist anzunehmen, dass die Trocknungskurve ähnlich der einer Konvektionstrocknung verläuft, wie im Folgenden erklärt wird.

Im ersten Abschnitt hängt die Trocknungsgeschwindigkeit nur von den äußeren Bedingungen ab, wie z.B. der Temperatur, der Feuchte, dem Druck und dem Stoffübergangskoeffizienten Luft/Trocknungsgut (bzw. Luftdruck, falls eine Konvektionstrocknung stattfindet). Wobei der erwähnte Stoffübergangskoeffizient wesentlich von der Luftgeschwindigkeit und der Form des Gutes abhängt. Im zweiten und dritten Abschnitt haben die Substrateigenschaften dominanten Einfluss auf den Verlauf der Trocknungskurve [17].

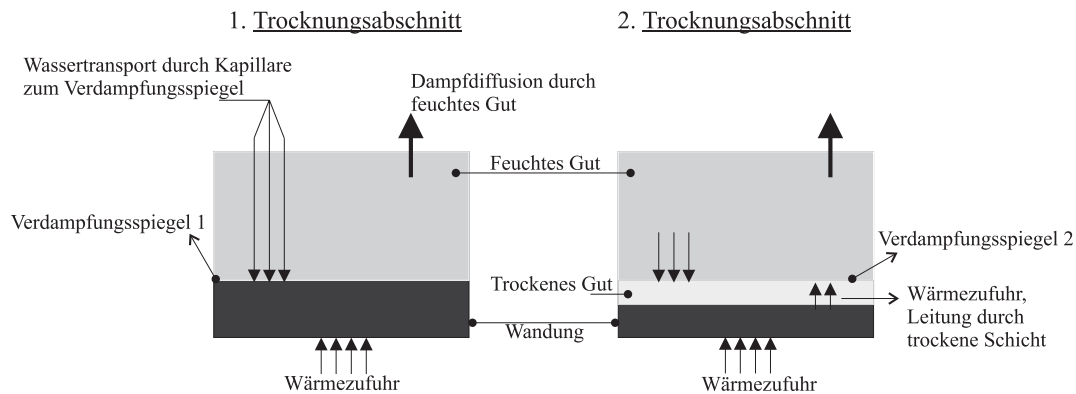


Abbildung 3.6: Trocknungsverlauf bei Kontakt Trocknung [57]

Im Trocknungsverlauf verhalten sich kapillarporöse nichthygroscopische und hygroscopische Trockengüter verschieden [86]. Bei nicht hygroscopischen Materialien läuft das Trocknen in zwei Abschnitten ab. Der erste Abschnitt erfolgt mit einer konstanten Trocknungsgeschwindigkeit und der zweite mit einer abnehmenden Trocknungsgeschwindigkeit (Abbildung 3.5). Die hygroscopischen Güter zeigen einen zweiten Wendepunkt, an dem die Trocknungsgeschwindigkeit bis zum Erreichen einer Gleichgewichtsfeuchte bis auf Null abnimmt. Dieser dritte Abschnitt ist auf Sorptionsverhalten zurückzuführen [57].

In dem Trocknungsprozess durch Wärmeleitung, der auch als Kontakt Trocknung bekannt ist, befindet sich das Substrat in unmittelbarer Berührung mit beheizten Flächen (Abbildung 3.6). Im ersten Trocknungsabschnitt sind Wärme- und Stoffstrom der Trocknung gleichgerichtet, wobei der Verdampfungsspiegel an der Substratoberfläche liegt. Im zweiten Trocknungsabschnitt wandert der Verdampfungsspiegel durch Wärmeaustausch ins Substratinnere, da der Kapillartransport bei sinkender Substratfeuchte nicht ausreicht, um Wasser nachzuliefern. Mit dem Verlauf der Trocknung erhöht sich der Transportwiderstand. Es kommt zu einer so genannten „Rückkondensation“ des bereits verdampften Wassers gegen den Kapillartransport des zum Verdampfungsspiegel fließenden Wassers. Dies kommt in der Praxis nur dann vor, wenn die Trocknung mit einer ruhenden Heizplatte erfolgt (z.B. Trockenschrank). Eine intensive Umwälzung des Materials löst dieses Problem, da die Materialoberfläche in ständiger Berührung mit der Heizplatte ist und die Trocknung mit einer Konvektionstrocknung vergleichbar ist (siehe Abbildung 3.7).

In dem Fall, dass es zwischen der Oberfläche und dem Kern der Feststoffteilchen eine Temperaturdifferenz gibt, hat Feuchtigkeit die Tendenz, von Orten höherer zu

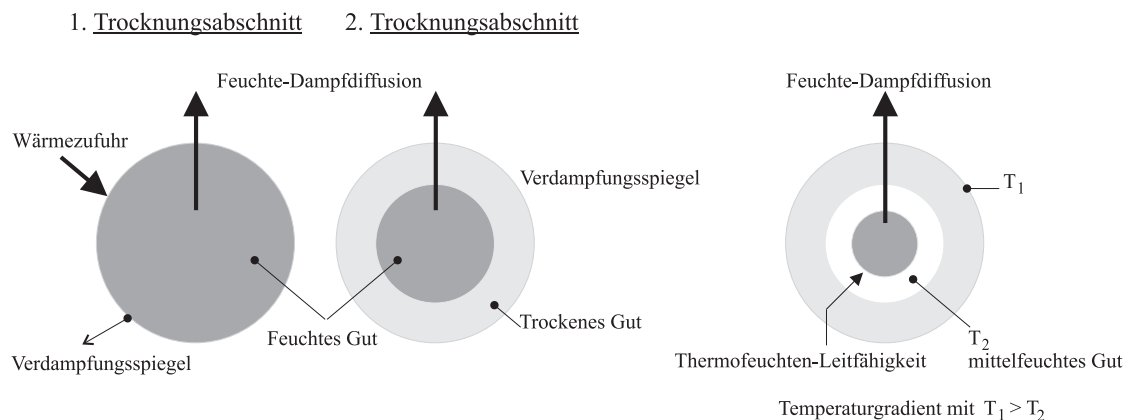


Abbildung 3.7: Trocknungsverlauf bei Konvektionstrocknung [57]

Orten niedrigerer Temperatur zu wandern. Diese Wirkung ist auch als Thermofeuchte-Leitfähigkeit bekannt. Wärmeaustausch in feuchten Substraten ist dann unmittelbar mit Stoffaustausch verbunden, d.h. der Wärmeaustausch wird immer vom Feuchtigkeitsaustausch (Feuchtigkeitsbewegung) begleitet. Wie Abbildung 3.7 zeigt, haben die Vektoren der Feuchte-Dampfdiffusion und der Thermofeuchte-Leitfähigkeit unterschiedliche Vorzeichen. Der Trocknungsprozess wird dadurch verlangsamt [47], [68].

Allerdings vermindert sich mit zunehmender Durchwärmung des Substrates, d.h. Verringerung des Temperaturgradienten, ihr Einfluss.

Ohne Temperaturgradienten ist die Feuchtigkeitsbewegung abhängig vom Feuchtigkeitsgradienten.

### 3.5.1 Der erste Abschnitt der Trocknungskurve

Im ersten Abschnitt der Trocknungskurve sind sowohl die Trocknungsgeschwindigkeiten als auch die Oberflächentemperatur des Substrates nahezu konstant. Die Substratfeuchtigkeit nimmt mit der Zeit linear ab, bis in der Kurve ein Knickpunkt, der so genannte erste kritische Punkt, sichtbar wird. Die Substratfeuchtigkeit, die dem ersten kritischen Punkt entspricht, heißt erste kritische Feuchtigkeit. In diesem Abschnitt fallen die Temperaturkurven für die Oberfläche und das Substratsinnere zusammen und die Temperaturen bleiben konstant, sodass kein Temperaturgradient im Substrat vorhanden ist [47].

Die Oberfläche des Trocknungssubstrates ist im ersten Abschnitt vollständig mit Wasser benetzt, deswegen wird die Trocknungsgeschwindigkeit allein durch den Stoffüber-

gang von der Partikeloberfläche an die Umgebungsluft bestimmt. Die Kapillaren des porösen Substrats führen Flüssigkeit zur Oberfläche, sodass die Wasserhaut auf ihr durch den Kapillarsog ständig erneuert wird.

Etwa am Ende des ersten Abschnittes der Trocknungskurve beginnen die größten Poren auszutrocknen. Daraus resultiert die allmähliche Abnahme der kapillaren Benetzung der Substratoberfläche. Da diese Minderung normalerweise sehr klein ist, kann die Änderung der Trocknungsgeschwindigkeit vernachlässigt werden [17].

Da bei nicht porigen Gütern (z.B. Gele) der Stofftransport nicht durch Dampfdiffusion, sondern durch Flüssigkeitsdiffusion erfolgt, wird am Ende des ersten Abschnittes kein Knickpunkt erkennbar und die Verdunstung erfolgt nur auf der Oberfläche [39].

### 3.5.2 Der Knickpunkt der Trocknungskurve

Mit dem Ablauf des Trocknungsvorganges nehmen die Substratfeuchtigkeit sowie dessen Leitfähigkeit graduell mit der Zeit ab, so dass die Trocknungsgeschwindigkeit sich verlangsamt. Es kommt am Anfang dieser Geschwindigkeitsverzögerung zu einem mehr oder weniger scharfen Wendepunkt der Trocknungskurve. Nach der Lage dieses Wendepunkts, der als Knickpunkt bezeichnet wird, ändern sich die physikalischen Bedingungen des Trocknungsvorganges. Das Wissen über die Lage des Knickpunktes ist von entscheidender Bedeutung zur Bewertung und für eine geeignete Steuerung des Trocknungsprozesses.

Wichtig zur Bestimmung der Lage des Knickpunktes sind die Stoffeigenschaften. Gelartige Stoffe weisen erheblich kleinere spezifische Oberflächen auf als körnige, da keine Grobporen vorhanden sind und dementsprechend der Kapillarsog ausfällt. Deswegen ist der Knickpunkt hier wenig oder gar nicht ausgebildet.

Nach Krischer [39] hängt die Lage des Knickpunktes bei gleicher Anfangsfeuchtigkeit von den Kapillaritätseigenschaften bzw. der Dicke des Substrats ab. Lykow [47] hat eine mathematische Beziehung zur Bestimmung der Lage des ersten Knickpunktes der Trocknungskurve aufgestellt. Die beiden oben genannten Methoden lassen sich insbesondere in dem Fall einer konvektiven Wärmeübergangstrocknung benutzen, die jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

### 3.5.3 Der zweite Abschnitt der Trocknungskurve

Wie schon beschrieben, sind bei hygroskopischen Substraten drei Trocknungsabschnitte wirksam, während es bei nicht hygroskopischen nur zwei sind.

Ist bei kapillarporösen hygroskopischen Substraten der gesamte kapillar gehaltene Wasseranteil entfernt, zeigt sich ein weiterer Knickpunkt, der in der Fachliteratur auch als zweite kritische Substratsfeuchte bezeichnet wird. Bei nicht hygroskopischen Substraten wird kein zweiter Knickpunkt sichtbar.

In der zweiten Abschnitt nimmt die Trocknungsgeschwindigkeit weiter ab, außerdem findet keine Oberflächenverdunstung mehr statt. Die Kapillarkräfte sind nicht mehr ausreichend, um die Feuchte bis an die Oberfläche des Trocknungssubstrates zu transportieren, so dass die Phasenumwandlung von flüssigem Wasser in Wasserdampf im Inneren des Substrates stattfinden muss. Verdunstungsprozesse geschehen damit allein im Substratinneren.

Die übertragene Wärme wird nicht mehr nur zur Verdampfung der Feuchte, sondern in steigenden Maße auch zur Erwärmung des Substrates verwendet.

Die benötigte Energie zur Verdunstung muss durch die bereits getrocknete Schicht an die Phasenumwandlungsstelle (siehe Abbildung 3.7), die auch als Trocknungs- oder Verdunstungsspiegel bezeichnet wird, transportiert werden [17]. Der entstehende Dampf diffundiert vom Verdunstungsspiegel durch das Substrat hindurch und wird erst dann von der Umgebungsluft aufgenommen (Konvektionstrocknung) oder mittels einer Pumpe abgesaugt (Vakuumtrocknung).

Die Form der Kurven der Trocknungsgeschwindigkeit im zweiten Abschnitt ist durch die Art der Feuchtigkeitsbindung am Substrat und durch den unterschiedlichen Mechanismus ihres Transports zu erklären [47].

### 3.5.4 Der dritte Abschnitt der Trocknungskurve

In Abbildung 3.5 ist der Trocknungsverlauf eines hygroskopischen Substrates dargestellt. Im dritten Abschnitt, wo die Gleichgewichtsfeuchte des Produktes erreicht wird, fällt die Trocknungsgeschwindigkeit des Substrates meistens linear auf Null ab [18]. Diese Gleichgewichtsfeuchte kann auch bei weiterer Wärmeenergiezufuhr nicht unterschritten werden. Hier scheint die Partialdruckdifferenz zwischen den inneren und äußeren Schichten des Substrates für den Feuchtetransport zur Substratoberfläche entscheidend.

Diese dritte Phase wird vom Sorptionsverhalten bestimmt. Das gebundene Oberflächenwasser und Zellinnenwasser wird hier aus dem Substrat entfernt [34].

Im Allgemeinen hängt die Trocknungsgeschwindigkeit von zwei Prozessen ab, zuerst von der Bedingung des Wärmetransportes an der Substratoberfläche, der von der Wärmeleitfähigkeit des Substrats abhängig ist, und dem Stofftransport des Dampfes von dem Verdampfungsspiegel [68].

Der Trocknungsverlauf hygroskopischer Substrate wird in Abbildung 3.5 durch eine durchgehende schwarze Linie dargestellt. Nicht hygroskopische Substrate werden mit einer gestrichelten Linie im weiteren Trocknungsverlauf ab Punkt C dargestellt, da kein dritter Trocknungsabschnitt stattfindet.

## 3.6 Trocknung unter Vakuum

In den meisten Fällen bietet die Vakuumtechnik eine energiesparende und produkt-schonende Vorbereitungstechnik, mit breiter Anwendung in der Industrie und in der Forschung. Manche Materialien können durch hohe Temperaturen, Luft oder Feuchtigkeit beschädigt werden, wenn sie im atmosphärischen Trockner getrocknet werden. Das Trocknen solcher Materialien in einer Vakuumtrocknung stellt gewöhnlich den besten Schutz für die Mitarbeiter, die Umwelt und für die Materialien selbst dar.

### 3.6.1 Physikalische Grundlagen der Vakuumtrocknung

Nach der Menge der im Vakuum verbleibenden Materie unterscheiden sich in der Technik unterschiedliche Qualitäten des erzielten Vakuums (Tabelle 3.6). Die meisten Trockner arbeiten im Grobvakuumbereich [43]. Im Anwendungsbereich der Trocknung und Entgasung wird ein Druckbereich von  $10^{-2}$  Pa bis  $10^4$  Pa ( $10^{-4}$  mbar bis 100 mbar) benötigt [27].

Tabelle 3.6: Druckbereiche in der Vakuumtechnik bei  $20^{\circ}\text{C}$  für Luft [41], [62]

Vakuumbereich	Druck [mbar]	Moleküle/ $\text{cm}^3$
Grobvakuum	1000...1	$10^{18} \dots 10^{17}$
Feinvakuum	$1 \dots 10^{-3}$	$10^{17} \dots 10^{12}$
Hochvakuum	$10^{-3} \dots 10^{-7}$	$10^{12} \dots 10^9$
Ultrahochvakuum	$10^{-7} \dots 10^{-12}$	$10^9 \dots 10^4$
Extra-Ultrahochvakuum	ab $10^{-12}$	$< 10^4$

Die Verminderung des Siedepunktwassers und der gesättigten Dampftemperatur stellen die wichtigsten Effekte bei einem solch Prozess dar. Bei vermindertem Druck sinkt die Siedepunkttemperatur der Flüssigphase und es erhöht sich die Differenz zwischen der Heiztemperatur im Trockner und der Verdampfungstemperatur. Dies führt zu einem schnelleren Trocknungsvorgang und einer höheren Verdampfungsrate [90], [26].

Eine graphische Darstellung des Druckes und Temperaturbereiches zeigt Abbildung 3.8, in der der Dampfdruck vom Wasser im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Flüssigphase steht.

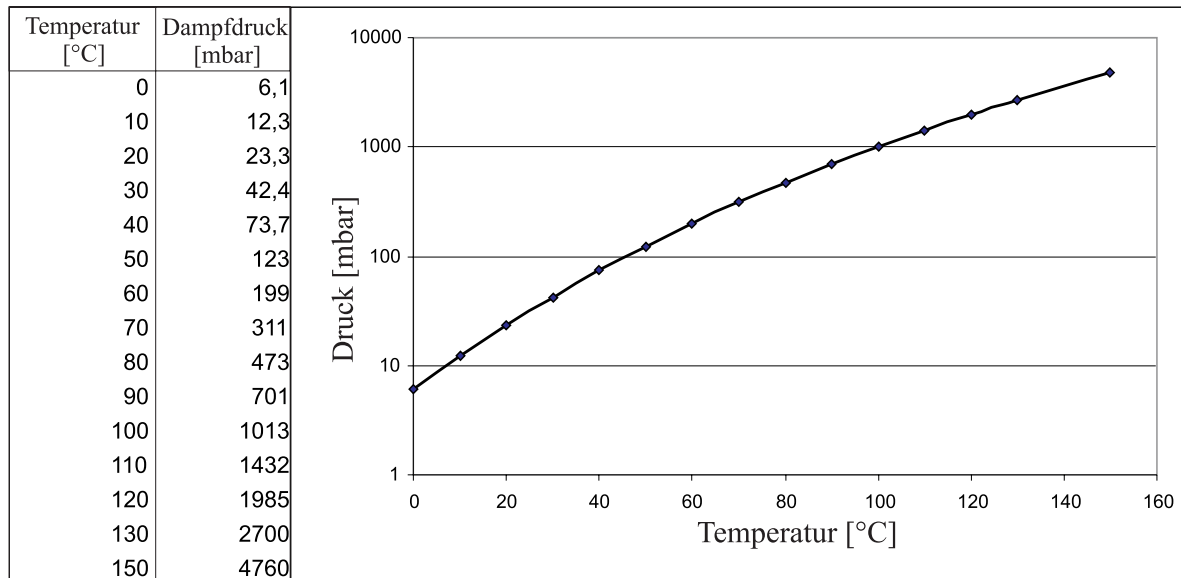


Abbildung 3.8: Dampfdruckkurve von Wasser [13]

### Einfluss des Vakuums auf den Trocknungsverlauf

Qualitativ unterscheiden sich Trocknungsverläufe im Vakuum geringfügig von Trocknungsverläufen unter Atmosphärendruck [43]. Energieübertragung, kapillare Feuchtleitung und Dampfbewegung wirken ähnlich wie bei der Trocknung unter Atmosphärendruck [41]. In Versuchen zur Ermittlung des Einflusses des Vakuums auf den Trocknungsverlauf wurde ermittelt, dass die Lage der Knickpunktkurve unabhängig vom Luftdruck ist und sowohl unter Vakuum als auch unter atmosphärischem Druck unverändert bleibt, da sie nur von temperaturabhängigen kapillaren Eigenschaften des Substrates bestimmt wird [39]. Die Anfangsgeschwindigkeit im ersten Abschnitt bleibt nicht konstant, sondern zeigt einen schwachen Rückgang. Bei der Konvektionstrocknung ist diese Abnahme bedingt durch das Zurücktretten der Menisken unter die Substratoberfläche stärker. Die Endtrocknungsgeschwindigkeit beim Vakuum liegt höher als bei der atmosphärischen Trocknung. Bei der Konvektionstrocknung ist die Endtrocknungsgeschwindigkeit durch den erhöhten Diffusionswiderstand des Trockenspiegels vermindert.



### Stoff- und Wärmebewegung im Vakuum

Bei der Vakuumtrocknung wird eine Störung der isothermen Gleichgewichtsbedingungen zwischen den Aggregatzuständen des Wassers durch Wärmezuführung über Pumpaggregate oder Kondensatoren erzeugt. Durch Druckgradienten aufgebaute Dichtegefälle saugen Wasserdampfmoleküle von dem Material ab [43].

Die Druckdifferenz bewirkt eine erhebliche Beschleunigung der Innenfeuchtigkeit von der Mitte hin zur Oberfläche (Abbildung 3.9). Mittels dieses Druckgradienten zwischen Partikelinnerem und Partikeloberfläche werden die Partikelstruktur zerstört und in den Kapillaren entstehende Brüden entfernt. Die Geschwindigkeit der Trocknung ist in diesem Fall von der Struktur der Stoffpartikel abhängig. Die chemisch gebundene Flüssigkeit wird hierbei nicht entfernt, wie schon in Abschnitt 3.3.2 beschrieben wurde, da sie unabhängig von Temperatur und Prozessdruck ist [26].

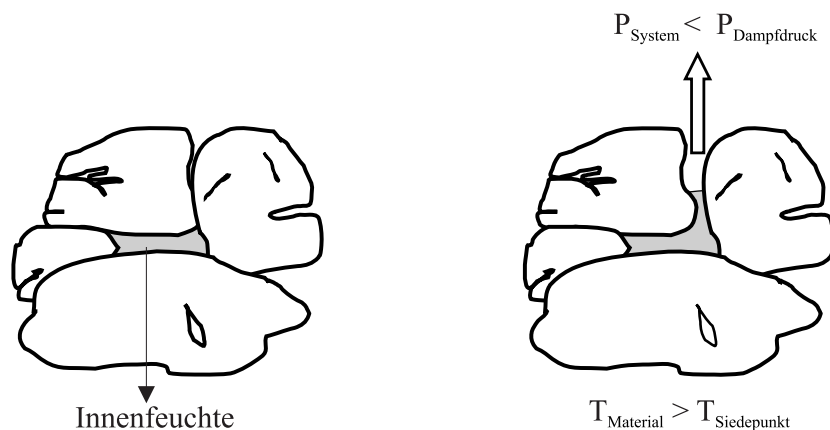


Abbildung 3.9: Abzug der Innenfeuchte aus einem Porensystem

In Vakuumkontakttrocknern wird Wärme durch Strahlung an die Substratoberfläche und durch Wärmeleitung in das Substratinnere geführt. Dampfdiffusion erfolgt im Sinne der Wärmezuführung, sodass der Dampf an der oberen freien Oberfläche austreten muss. Trockene Stoffe zeigen keine großen Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit der Porenluft bei Druckminderung [41]. Bei feuchten Poren wird die Wärmeübertragung durch Dampfdiffusion intensiv erhöht [39]. Sie führt zu einer Beschleunigung der Anfangstrocknungsgeschwindigkeit verglichen mit Trocknung unter Atmosphärendruck.

Im Gegensatz zum Atmosphärendruck strömt der Dampf im Vakuum und diffundiert nicht nur [41]. Er bewegt sich (reine Wasserdampfphase) nach den Gesetzmäßigkeiten der Strömungstechnik [43].

Durch die niedrige Trockentemperatur treten bei Vakuumtrocknung weniger Wärmeverluste auf [19].

### Druckeinflüsse im Vakuum

Der Druck im Reaktorraum hat großen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit. Abbildung 3.10 zeigt, wie die Trocknungsgeschwindigkeit mit fallendem Druck ansteigt, insbesondere dann wenn das Substrat einen sehr feuchten Zustand aufweist. Im Verlauf des Trocknungsvorgangs nimmt die Feuchte des Substrates bzw. ihre Wärmeleitfähigkeit ab. Dies führt zum Abfallen der Trocknungsgeschwindigkeit. Diese Abbildung stellt die Trocknungseigenschaften eines grobporigen Substrats unter statischer Vakuumkontakttrocknung dar. Eine Durchmischung des Substrates führt nach Kröll [41] zu deutlich schnelleren Trocknungsvorgängen.

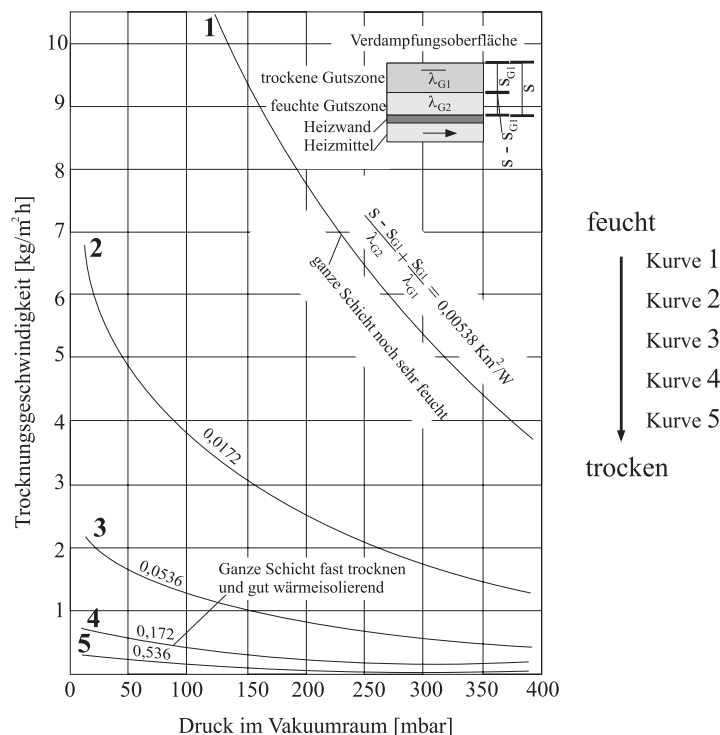


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der Trocknungsgeschwindigkeit von Druck und Feuchtegehalt [41]

Die Nutzung von niedrigen Druckbereichen zeigt sich auch im experimentellen Versuch als effektiv. Krömer [43] trocknete Steinkohle unter Vakuum und fand heraus, dass die Versuche mit höherem Druck ( $> 40$  mbar) zu schlechteren Trocknungsergebnissen führen, da die im Trockner verbliebene Luft den Transport des Wasserdampfes

zum Kondensator erschwert. Die Lebensmittel- und biochemische Industrie arbeiten mit sehr niedrigen Drücken, weil höhere Drücke zu einem Risiko von Denaturierungsprozessen von Eiweißen und Enzymen durch Hitze führen [78].

Auch die Verdampfung wird mit Abnahme des Siedepunktes begünstigt, da weniger Energie zum Verdampfungsprozess zugeliefert wird (Abbildung 3.11).

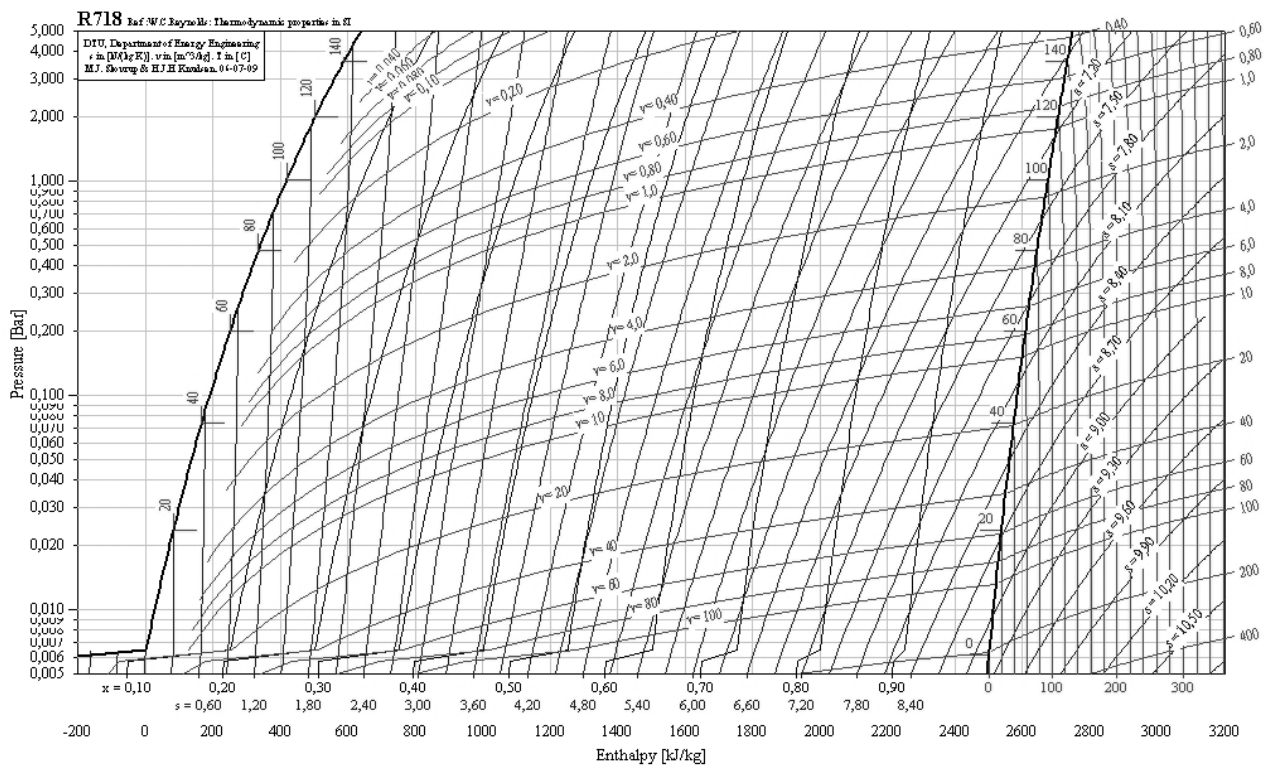


Abbildung 3.11: Enthalpie – Druckdiagramm von Wasser (Programm Coolpack)

### Temperatureinflüsse auf das Vakuum

Je höher der Temperaturgradient zwischen Heizmittel- und Siedetemperatur ist, desto schneller erfolgt die Trocknung [43], [26].

Wie Abbildung 3.12 verdeutlicht, führt eine steigende Heizmitteltemperatur zur Verkürzung der Trocknungszeit [41]. Perlon (Nylon) wurde unter 0,13 mbar mit unterschiedlichen Heizmitteltemperaturen von 100, 125 und 150°C getrocknet. Die Trocknung bei 150°C erfolgte 6-mal schneller als die Trocknung bei 100°C.

Bei höheren Temperaturen lassen sich bessere Trocknungsraten erreichen. Bei man-

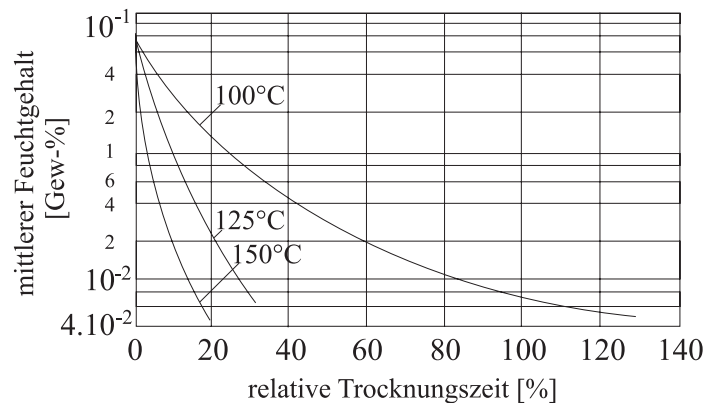


Abbildung 3.12: Abnahme des Feuchtegehaltes mit zunehmender Behandlungszeit.  
Vakuumtrocknung von Perlon [41]

chen Materialien müssen die Behandlungstemperaturen begrenzt werden, da sie sich ab einer bestimmten Temperatur farblich verändern, koagulieren, sich zersetzen oder die Heizfläche belegen. So sind eiweißreiche Substrate zum Beispiel Behandlungstemperaturen von mehr als 60-70°C nicht auszusetzen (reine Eiweißstoffe sogar nur 40°C) [31].

Im Lebensmittel- und pharmazeutischen Bereich ist eine Trocknung bei hoher Temperatur nicht erwünscht. Nach Schlünder [69] können höhere Temperaturen zu einer Qualitätsminderung von Tabletten im pharmazeutischen Bereich führen. Auch Lebensmitteleigenschaften wie z.B. das Aroma können durch hohe Temperaturen beeinträchtigt werden. Darüber hinaus wird im Vergleich zu anderen Trocknungsverfahren bei der Vakuumtrocknung durch niedrige Temperaturen sowie durch das Fehlen von Luftsauerstoff die Problematik der Korrosion in Anlagen reduziert [19].

## Kapitel 4

# Entwicklung des Versuchsprogramms

Das vorliegende Kapitel enthält das Konzept zur Erstellung der Versuchsprogramme zur Untersuchung der Vakuum-Siede-Trocknung von Restabfallstoffen und Energiepflanzen. Die Bewertungskriterien einzelner Versuchsanlagen werden auch diskutiert.

Anhand vorhandener Grundlagen der Trocknung aus Literatur und Erfahrungswerten aus unter anderem der Chemie, Pharmazie und Lebensmittelwirtschaft sowie Vorversuchen, wurde die Struktur dieser Arbeitsplanung erstellt.

Die methodische Durchführung des Versuchsprogramms beinhaltet die folgenden Teilaufgaben:

- Reihenuntersuchungen in Versuchsanlagen im Labormaßstab, halb- und großtechnischen Maßstab;
- Bewertung des Systems unter ökonomischen und ökologischen Aspekten mit Schwerpunkt auf Energieaufwand, Produktqualität und Emissionsbelastung.

Wesentliche Eigenschaften des Trocknungsprozesses, wie z.B. Trocknungsrate, Trocknungsdauer oder Belegung auf der Austauschfläche, sind in hohen Maßen von Behandlungsdruck und Behandlungstemperatur abhängig [31].

Der Einfluss des Behandlungsdrucks auf den Trocknungsprozess unter Vakuum wurde

in Abschnitt 3.6 diskutiert. Der Druck hat sehr großen Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit, insbesondere bei hoher Feuchtigkeit des Substrates. Es wurde auch aufgeführt, dass die Abnahme des Siedepunktes den gesamten Trocknungsprozess „erleichtert“ und Probleme wie Denaturierung von Proteinen durch Verminderung des Behandlungsdruckes vermieden werden. In der großtechnischen Versuchsanlage wurden die Versuche bei 50 mbar absolutem Druck betrieben, der maximale absolute Druck, für den die Anlage dimensioniert wurde. In der Laboranlage wurde ebenfalls ein absoluter Druck von 50 mbar hergestellt, um den Trocknungsverlauf bei der anderen Versuchsanlage zu simulieren. Die Vakuumpumpe dieser Versuchsanlage ermöglicht auch stärkere absolute Drücke. Der Druck von 50 mbar liegt im Grobvakuumbereich, wie in Abschnitt 3.6.1 beschrieben. Eine Trocknung in sehr niedrigen Vakuumbereichen, wie z.B. in Feinvakuum, ist hier nicht erwünscht, da diese sehr hohe Investitions- und Energiekosten verursacht [63].

Um den Einfluss des absoluten Druckes auf den Trocknungsprozess unter Vakuum zu überprüfen, wurden in der halbtechnischen Versuchsanlage Versuche mit verschiedenen absoluten Drücken durchgeführt (50, 150 und 300 mbar).

Die Behandlungstemperatur besitzt einen großen Einfluss auf die Behandlungszeit des Trocknungsvorgangs und die angestrebte Trocknungsrate. Hohe Temperaturen führen zu einer hohen Trocknungsrate (Abschnitt 3.6). Zu berücksichtigen ist natürlich, dass der Einsatz von einer hohen Behandlungstemperatur zu einer Beeinträchtigung der Substratqualität führen kann. Da in den Versuchen Substrate wie Restabfall und Energiepflanzen, die Proteine bzw. Kunststoffe beinhalten, verwendet wurden und das Hauptziel in der Erzeugung von Ersatzbrennstoffen lag, wurde eine Siedetemperatur des Prozesses von 70°C nicht überschritten. Dagegen wurde ein hoher Temperaturgradient angestrebt, da dieser den Trocknungsprozess wesentlich beschleunigt (Abschnitt 3.6). Hohe Temperaturgradienten (bis zu 105°C / 50 mbar) wurden bei der Durchführung von Vorversuchen in der Laboranlage problemlos eingesetzt.

Um einen breiten Messbereich zu erfassen, wurden die Temperaturgradienten (Differenz von Heizmittel- zu Siedetemperatur) in den Versuchen variiert.

Um einen höheren Druckgradienten zwischen Partikelinnerem und Partikeloberfläche zu erreichen und damit den Trocknungsprozess, wie in Abschnitt 3.6 beschrieben, zu begünstigen, wurde das Substrat bei der großtechnischen Versuchsanlage vorerwärmt. Hierdurch wird der Dampfdruck innerhalb des Materials erhöht und damit die Bewegung der Innenfeuchtigkeit von der Mitte zur Oberfläche beschleunigt.

Um Probleme wie die so genannte Rückkondensation, die den Transportwiderstand

im Verlauf der Trocknung erhöht, zu verhindern, wurde das Substrat bei der halbtechnischen und großtechnischen Versuchsanlage kontinuierlich umgewälzt (Abschnitt 3.5). Die ständige Berührung der Substratoberfläche mit der Heizplatte des Trockners bewirkt eine Erhöhung der Wärmezufuhr zum Substrat und eine Beschleunigung des Prozessverlaufs (Abschnitt 3.4.1). Die Trocknung in der Laboranlage erfolgte dagegen durch eine ruhende Heizplatte, da der Aufbau einer Substratdurchmischung nicht möglich war.

Die Versuche in der großtechnischen Versuchsanlage wurden vor den Versuchen in der Laboranlage und der halbtechnischen Versuchsanlage durchgeführt. Zielsetzung dieser Untersuchung war es, eine erste Grundsatzaussage über Funktionsfähigkeit sowie Wettbewerbsfähigkeit der Technologie in der Abfallwirtschaft treffen zu können. Basisdaten für den Betrieb mit verschiedenen Substraten wurden hierbei ermittelt. Die aus dieser Anlage gewonnenen Erfahrungen hatten großen Einfluss auf den Anlagenaufbau sowie das Versuchskonzept der halbtechnischen Versuchsanlage. Die Trocknungsqualität wurde durch die aus dem Substrat entzogene Menge Wasser ermittelt. Der gesamte Energieaufwand wurde betrachtet.

In der großtechnischen Versuchsanlage können nur Substrate in großen Mengen verarbeitet werden, sodass Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Versuchswiederholungen zu einem hohen Zeitbedarf bzw. sehr hohen Kosten führen. Eine getrennte Erfassung des elektrischen Energieaufwands der einzelnen Anlagenteile war bei der großtechnischen Versuchsanlage nicht zu verwirklichen. Der Stromverbrauch erfasste daher die Summe von allen elektrischen Anlagenteilen. Durch den Bau einer halbtechnischen Versuchsanlage konnten detaillierte Reihenuntersuchungen durchgeführt werden. Des Weiteren ermöglicht diese Anlage eine wesentliche Verbesserung der Beprobung sowie eine Ermittlung der Massenbilanz einzelner Stoffströme und der Energieaufwände einzelner Anlagenteile.

Während bei der großtechnischen Versuchsanlage nur ein Versuch täglich durchgeführt werden konnte, wurden bei der halbtechnischen Versuchsanlage zwei bis drei Versuche täglich durchgeführt. Die Bestimmung optimaler Betriebsparameter für die Vakuum-Siede-Trocknung konnte auf diese Weise verwirklicht werden.

Die Versuchsdurchführung in der Laboranlage folgte dem Ziel, die relevanten Einflussparameter bei der Trocknung unter Vakuum zu identifizieren, um eine Versuchsplanung für die halbtechnische Versuchsanlage zu entwickeln. Da bei der Laboranlage nur sehr geringe Mengen an Substrat pro Versuch untersucht werden können, wurde in dieser Anlage eine Versuchsreihe mit einem homogenen Substrat durchgeführt

(Maissilage).

Die aus den Versuchen mit der Laboranlage sowie der großtechnischen Versuchsanlage gewonnenen Erfahrungen wurden bei der Versuchsplanung und Durchführung für die halbtechnische Versuchsanlage übernommen. Untersuchungen der festen, flüssigen und gasförmigen Produkte aus den Trocknungsvorgängen wurden durchgeführt. Der Energieaufwand des Prozesses wurde betrachtet und mit anderen am Markt etablierten Trocknungsanlagen verglichen. Die Qualitäten des entstehenden Kondensates und der Abluft wurden gemäß der Richtlinien für Emissionen aus Trocknungsanlagen bewertet. Die Qualität des Trockenproduktes wurde anhand des erreichten Trockensubstanzgehaltes bzw. der bei dem Prozess entzogenen Wassermenge bestimmt. Bei der halbtechnischen Versuchsanlage wurde des Weiteren eine Temperaturmessung der Reaktoroberfläche durchgeführt, um die Wärmeverluste durch freie Konvektion und Strahlung, wie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben, zu berechnen.

## 4.1 Bewertungskriterien für die Auswertung

Im abfallwirtschaftlichen Bereich stehen insbesondere die Qualität der festen, flüssigen und gasförmigen Produkte aus der Trocknung sowie energetische Gesichtspunkte im Vordergrund. Die untersuchten Anlagen wurden jedoch getrennt bewertet, da sie zu unterschiedlichen Fragestellungen konzipiert wurden. Die verwendeten Bewertungskriterien der einzelnen Versuchsanlagen werden im Folgenden erläutert.

### 4.1.1 Laboranlage

Die folgenden Punkte wurden als Bewertungskriterien der Laboranlage verwendet:

- Erreichter Trockensubstanzgehalt,
- Menge und Qualität des Kondensates.

In der Laboranlage wurde die Trocknung durch die ausgetriebene Feuchte bzw. erreichte Trockensubstanzgehalt bei den verschiedenen Behandlungsparametern (Temperatur, Trocknungsdauer) bewertet. Das aufgefangene Kondensat wurde hinsichtlich seiner Qualität bewertet.



### 4.1.2 Halbtechnische Versuchsanlage

Die halbtechnische Versuchsanlage wurde, wie schon erwähnt, nach der Qualität der festen, flüssigen und gasförmigen Produkte aus der Trocknung sowie des Energieaufwandes untersucht. Des Weiteren wurde der thermische Nutzungsgrad ermittelt. Als Nutzungsgrad wird das Verhältnis von energetischem Nutzen zu energetischem Aufwand bezeichnet [42]. Der spezifische Energieaufwand, d.h. die benötigte Energie zur Trocknung dividiert durch die Masse der ausgetriebene Feuchte, wurde außerdem bestimmt.

Produkteigenschaften wie Verklebungsverhalten und Homogenität wurden optisch nach dem Trocknungsprozess untersucht. Die wesentlichen Einflussparameter der Reihenuntersuchung, die variiert wurden, sind, wie schon erwähnt, absoluter Druck und Behandlungstemperatur.

Die folgenden Punkte wurden als Bewertungskriterien der halbtechnischen Versuchsanlage verwendet:

- Erreichter Trockensubstanzgehalt,
- Menge an Kondensat und Qualität,
- Abluftentstehung und Qualität,
- Energetische Leistung: spezifischer Energieaufwand der gesamten Anlage (thermisch und elektrisch) bei allen Versuchen,
- Thermischer Nutzungsgrad: Wärmeleistung bei dem untersuchten Temperaturgradienten zwischen Trockner und Umgebung,
- Produkteigenschaften nach Trocknung:
  - Verklebungs- und Verkrustungsverhalten (z.B. schmelzende Kunststoffpartikel),
  - Homogenität.

### 4.1.3 Großtechnische Versuchsanlage

Das Festsubstrat aus der Trocknung der großtechnischen Versuchsanlage wurde durch Bestimmung der erreichten Trockensubstanzgehalte bewertet. Die Qualität und Menge des Kondensates aus dem Trocknungsprozess wurden bestimmt. Die Entstehung

von Abluft wurde untersucht. Die spezifischen Energieaufwände der Versuche wurden auch ermittelt.

Produkteigenschaften wie Verklebungsverhalten und Homogenität wurden nach der Trocknung optisch untersucht. Der wesentlich zu variierende Einflussparameter der Reihenuntersuchung war die Trocknungsdauer.

Die folgenden Punkte wurden als Bewertungskriterien der großtechnischen Versuchsanlage verwendet:

- Erreichter Trockensubstanzgehalt,
- Menge und Qualität des Kondensates,
- Abluftentstehung,
- Energetische Leistung: spezifischer Energieaufwand der gesamten Anlage (thermisch und elektrisch) bei allen Versuchen,
- Produkteigenschaften nach Trocknung:
  - Verklebungs- und Verkrustungsverhalten (z.B. schmelzende Kunststoffartikel),
  - Homogenität.

Die technische Beschreibung der einzelnen Versuchsanlagen und deren Versuchsvarianten erfolgt im Kapitel 5. Im Einzelnen wird hier auf Probennahme- und Messstellen sowie Analytik der Substrate und Messmethoden eingegangen.

Die Versuchsdurchführung und Ergebnisse liegen in Kapitel 6 vor. Die Auswertung und Diskussion enthält Kapitel 7, wobei die spezifischen Energieaufwände der halb- und großtechnischen Versuchsanlagen mit schon am Markt etablierten physikalischen und biologischen Verfahren verglichen werden. Diese Arbeit schließt in Kapitel 8 mit der Schlussfolgerung und Empfehlung möglicher weiterzuführender Untersuchungen.

# Kapitel 5

## Material und Methoden

### 5.1 Versuchsanlagen

Die drei verschiedenen untersuchten Versuchsanlagen werden im folgendem beschrieben und die Probennahme- und Messstellen der einzelnen Anlagen dargestellt.

#### 5.1.1 Laboranlage

##### Technische Beschreibung

Die Vakuumstationsanlage des Labors der TU Braunschweig, die in Abbildung 5.1 dargestellt ist, besteht hauptsächlich aus zwei Komponenten, dem Vakuumtrockenschrank und dem Vakuumpumpenstand.

Der Trockenschrank der Firma Salvis hat ein Innenvolumen von 52 Litern. Er verfügt über vier mit Heizspiralen versehenen Trockenblechen, über die das Substrat direkt mittels Kontakt beheizt bzw. getrocknet werden kann. Die enthaltene Luft und die entstehenden Dämpfe in dem Trockenschrank werden über eine vakuumfeste Schlauchleitung von einem Vakuumpumpenstand abgesaugt (Saugseite Schlauch, siehe Abbildung 5.2), um den gewünschten absoluten Druck in der Anlage zu erreichen.

Der Vakuumpumpenstand LVS 310p der Firma Ilmvac ist eine geregelte Pumpe und verfügt über eine Saugleistung von  $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$  mit einem minimalen absoluten Druck von 8 mbar und einer Pumpleistung von 0,18 kW. Zum Schutz der Pumpe vor Fremd-

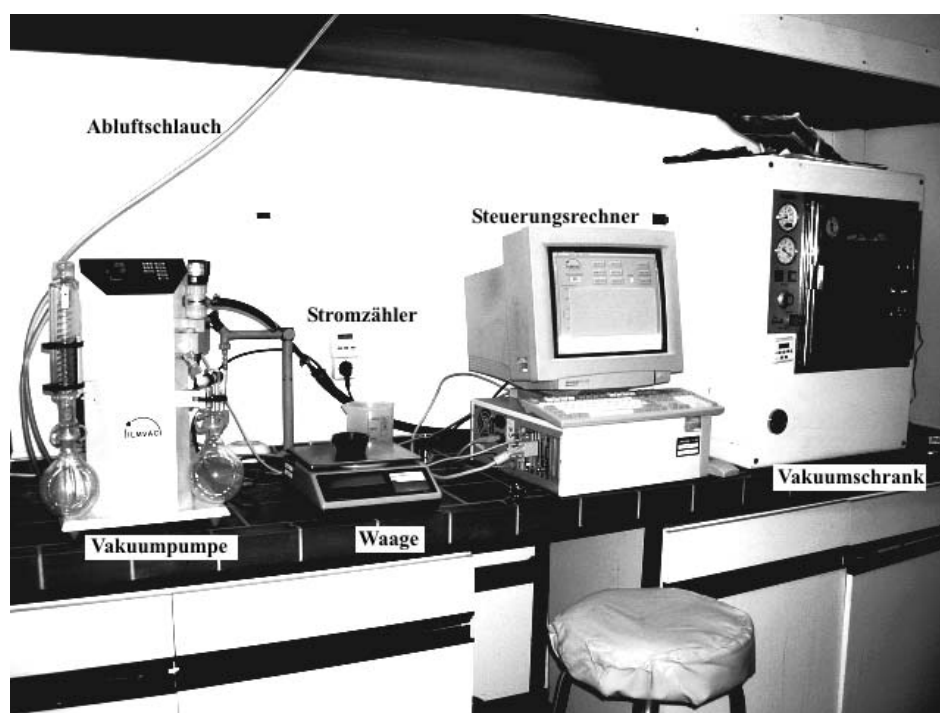


Abbildung 5.1: Vakuumstationsanlage Labor TU Braunschweig

stoffen werden die abgesaugte Luft und Brüden zunächst durch einen saugseitigen Abscheider geführt, in dem flüssiges Wasser und grobe Partikel aufgefangen werden können, und danach druckseitig zum Kondensator zur Rückgewinnung von Kondensaten weitergeführt. Übrige Gase werden über einen Abluftschlauch abgeführt. Der Druckverlauf sowie die Pumpensteuerung werden mittels eines Programms in dem Steuerungsrechner geregelt. Die Taktung der Stromzähler ist auf 0,01 kWh begrenzt. Die Stromverbräuche von der Pumpe und dem Vakuumschrank werden mittels unterschiedlicher Stromzähler ermittelt. In Abbildung 5.2 sind Informationen über den Aufbau des Pumpenstandes zu finden.

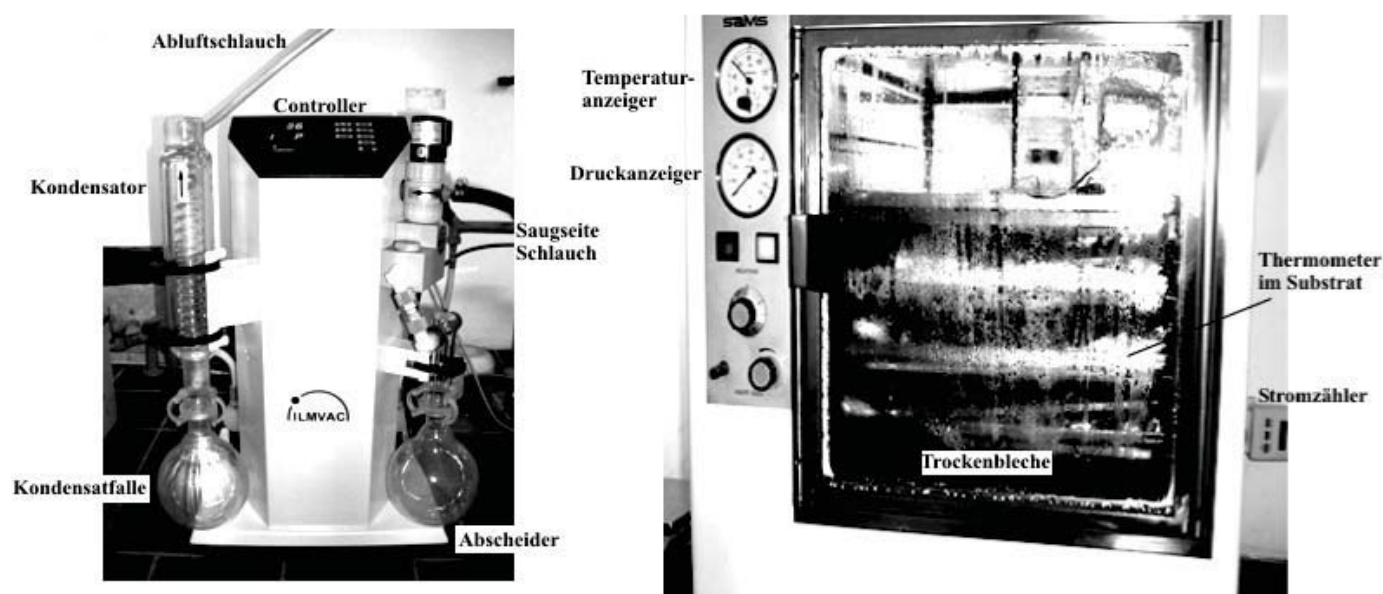


Abbildung 5.2: Vakuumpumpenstand und Vakuumtrockenschrank

### Mess- und Probenahmestellen

Die Messstellen der Laboranlage sind im Folgenden beschrieben. Der zeitliche Druckverlauf im System wird über den Rechner erfasst (siehe Abbildung 5.1). Die anderen Parameter werden diskontinuierlich (halbstündig) manuell erfasst. Das Gewicht des Substrates wird vor und nach der Trocknung gemessen. Die Menge an Kondensat, die sich in Abscheider und Kondensatfalle ansammelt, wird zusammen betrachtet. Nachfolgende Parameter werden gemessen:

Vakuumschrank: Temperatur des Schrankes, Temperatur des Substrates, Energieverbrauch des Schrankes

Vakuumpumpe: Absolutdruck, Energieverbrauch der Vakuumpumpe

Die Probenarten sowie die Parameter, die durch Analyse bestimmt werden, sind in der Tabelle 5.1 beschrieben.

Tabelle 5.1: Probenarten und Analysen

Probenart	Analysen
Substrat vor und nach Trocknung	Trockensubstanzgehalt
Kondensat	CSB, TOC, pH-Wert

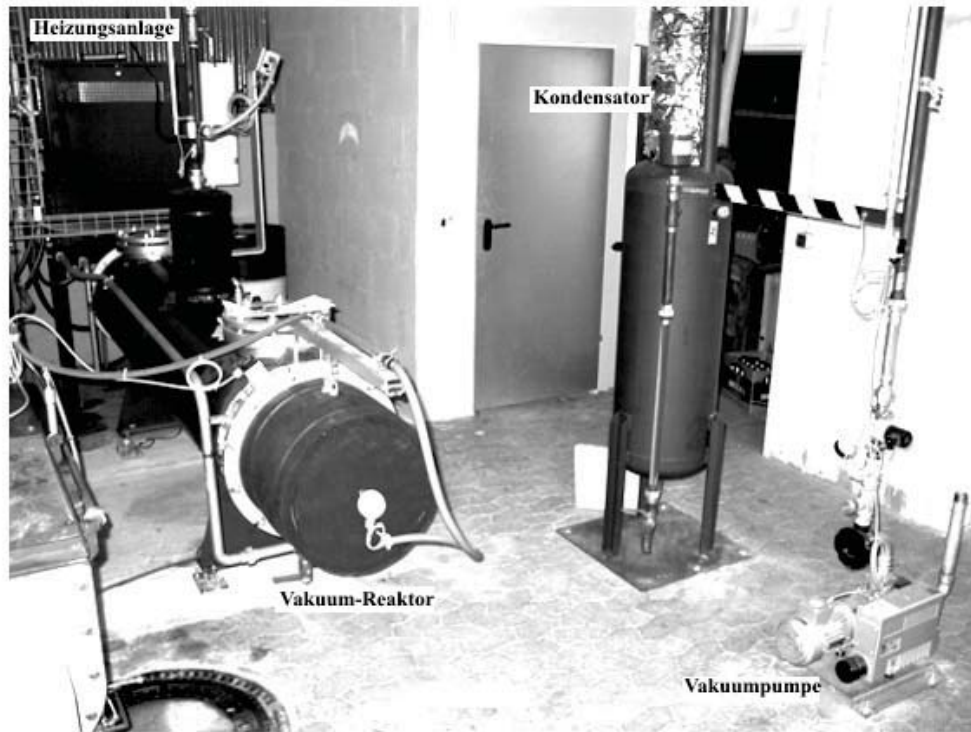


Abbildung 5.3: Ausschnitt der halbtechnischen Versuchsanlage zur Vakuum-Siedetrocknung, Standort TU Braunschweig

### 5.1.2 Halbtechnische Versuchsanlage

#### Technische Beschreibung

Die Vakuum-Siede-Behandlung ist ein von der Firma ISKA GmbH entwickeltes und patentiertes Verfahren. Die Vakuumtrocknungsanlage besteht aus einem Vakuum-Reaktor, einer Heizanlage, einem Kondensationssystem und einem Vakuumsystem sowie Verbindungsleitungen und MSR-Einrichtungen (Messen, Steuern, Regeln). Die Trocknung erfolgt über einen Kontakt Trockner mit Umwälzung des Substrates durch eine Spiralschnecke. Ein Ausschnitt der Anlage ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die einzelnen Anlagenteile werden im Folgenden beschrieben.

### *Vakuum-Reaktor*

Der Vakuum-Reaktor weist einen Durchmesser von 400 mm und eine Länge von 2500 mm auf und ist mit einer Wendelschnecke mit aufgeschweißten Überwerfern ausgestattet. Der Reaktorkörper ist isoliert und wird durch eine mit Thermoöl gefüllte Mantelheizung in der Außenwand beheizt. Der Reaktorraum wird über einen Stutzen am Reaktordach mittels kontinuierlichen Pumpbetriebs einer Drehschieber-Vakuumpumpe entleert. Der entstehende Dampf (Brüden) wird über den Stutzen aus dem Reaktor zu einem Kondensator abgeführt.

Das Substrat wird in der Versuchsanlage durch eine reversierende Schneckenbewegung vor und zurück bewegt und dadurch gleichmäßig im Reaktorkörper verteilt. Die Wendelschnecke dient sowohl der Befüllung, Entleerung als auch Durchmischung des Substrates während der Trocknung und wird durch einen Frequenzumrichter (Micro-master 440, Fa. Siemens) gesteuert. Für die Versuche wurde eine Drehbewegungsdauer von 30 Sekunden mit anschließender Pause von zwei Sekunden gewählt.

### *Heizungsanlage*

Die Heizungsanlage besteht aus der elektrischen Heizung Modell 300 der Firma Regloplas. Die produzierte Wärme wird durch den Wärmeträger Thermoöl auf den Vakuum-Reaktor übertragen.

### *Kondensator*

Die entstehenden Brüden aus dem Vakuum-Reaktor werden in dem Kondensator abgeschieden. Die entstehende Wärme in dem Kondensator wird durch die Kältemaschine Modell MMK 010 der Firma Hafner-Muschler entzogen. Der Kondensator wird zwischen die Pumpe und den Vakuum-Reaktor angeordnet. Dies erfolgt um das Abluftvolumen zu verringern, den Absolutdruck im Vakuum-Reaktor zu reduzieren und die Vakuumpumpe vor Kondensation und Schmutzstoffen zu schützen.

### *Vakuumpumpe*

Eine kontinuierlich arbeitende Drehschieber-Vakuumpumpe Modell R50025 der Firma Busch entlüftet den Vakuum-Reaktor. Die Höhe des Vakuums wird durch einen Vakuumcontroller geregelt. Der entstehende Dampf (Brüden) wird aus dem Trocknungsprozess durch die Pumpe abgeführt und zu dem Kondensator weitergeleitet.

Die halbtechnische Versuchsanlage stellt alle wesentlichen Teile der im Folgenden beschriebenen großtechnischen Versuchsanlage dar, sodass eine zukünftige Untersuchung zum Scale-up der Anlage vereinfacht wird.

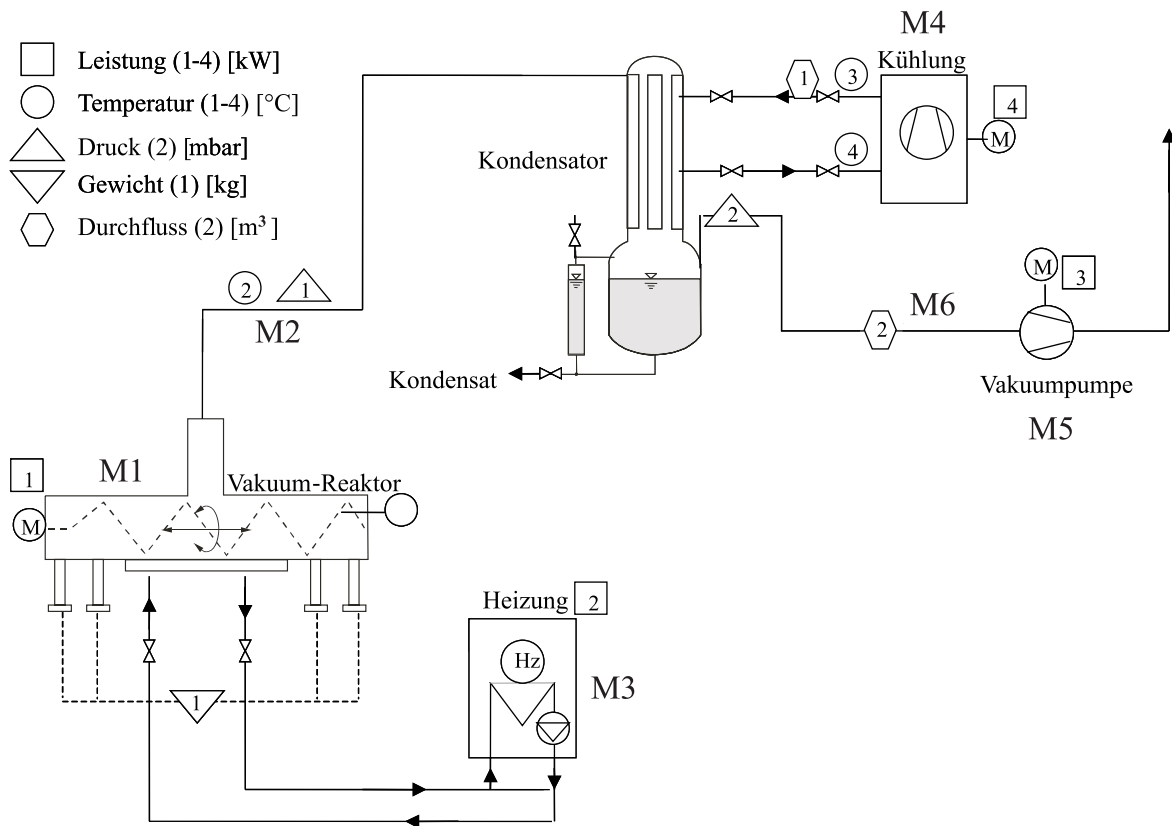


Abbildung 5.4: Messstellen der halbtechnischen Versuchsanlage

### Mess- und Probenahmestellen

In Abbildung 5.4 sind die Messstellen der Anlage dargestellt. Nachfolgende Parameter lassen sich an den einzelnen Messstellen verfolgen:

- M1: Gewicht des Substrates, Temperatur im Reaktor, Energieverbrauch der Schnecke im Reaktor
- M2: Druck, Temperatur der Brüden
- M3: Energieverbrauch der Heizanlage
- M4: Energieverbrauch des Kühlsystems, Einlauf- und Auslauftemperatur des Wassers, Durchflussvolumen Wasser
- M5: Energieverbrauch der Vakuumpumpe
- M6: Gasvolumenzähler

Die Messwerte aller Messstellen außer dem Gasvolumenzähler M6 und Durchflussvo-



lumenzähler Wasser M4 werden mit dem Programm DASyLab während der Versuchsdurchführung kontinuierlich gespeichert und lassen sich über einen Rechner verfolgen.

Bei der elektronischen Datenerfassung der Gewichtsmessung des Vakuum-Reaktors traten zahlreiche Probleme mit der installierten Wägezelle auf. Erst bei der letzten Versuchsreihe „mechanisch aufbereitete Restabfälle“ konnten die Probleme behoben und die Daten im Rechner erfasst werden.

Nachdem ein Fehler in der Datenerfassung des Stromverbrauchs der Kältemaschine ermittelt wurde, erfolgte bei der Versuchsreihe mit dem Substrat „mechanisch aufbereitete Restabfälle“ die Installation eines Drehstromzählers direkt an der Kälteanlage (siehe Abbildung 5.5). Um die Kälteenergie der Kältemaschine zu berechnen, wurden eine Wasseruhr und zwei Temperaturfühler installiert. Der Drehstromzähler und die Wasseruhr wurden während des Versuches manuell alle 30 Minuten abgelesen.

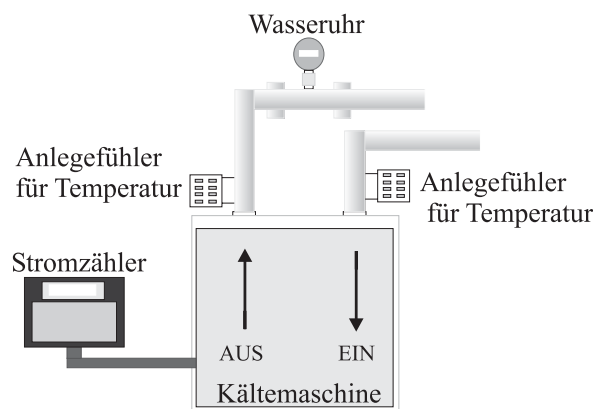


Abbildung 5.5: Messstellen M4 Kältemaschine

Die Abluft, die die Vakuumpumpe durchströmt, ist durch den Einbau eines Gasballastventils ständig mit Umgebungsluft vermischt, damit der Wasserdampf nicht in der Pumpe kondensiert. Zur Abluftanalytik bzw. Entnahme von Abluftproben wurde eine kleine Vakuumpumpe zum Umleiten der Abluft (Bypass) hinter dem Kondensator installiert (Abbildung 5.6). Diese Probennahmestelle wurde nur während der Versuche mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen verwendet. Für die Maissilageversuche wurde eine Luftgemischprobe aus der Drehschieber-Vakuumpumpe entnommen.

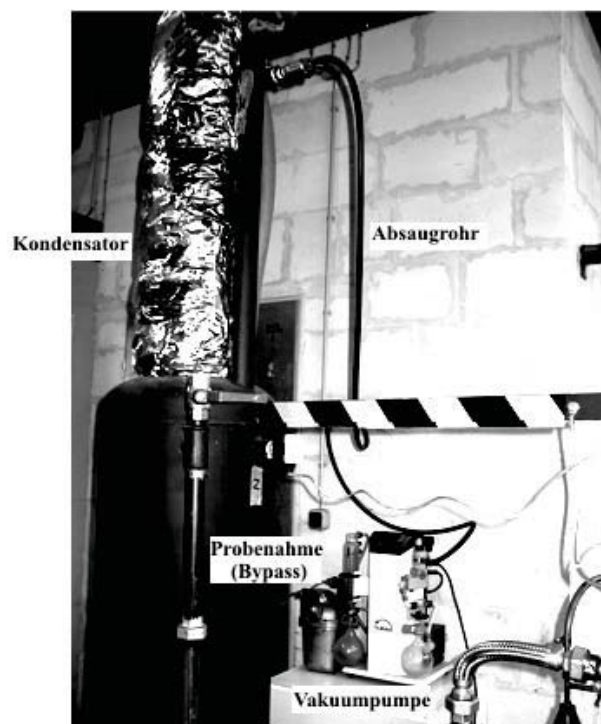


Abbildung 5.6: Probennahme Abluft

Die Arten der Proben sowie die Analyseparameter sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Analyse findet abhängig vom Substrat in einem unterschiedlichen Umfang statt (Maissilage oder mechanisch aufbereitete Restabfälle). Dies ist auf die entsprechende Verordnung für die Trocknung von Abfällen zurückzuführen.

Tabelle 5.2: Art der Probennahme und Analyse bei der halbtechnischen Versuchsanlage

Probenart	Analysen
Substrat vor und nach Trocknung	TS
Kondensat	Maissilage: CSB, TOC Restabfälle: CSB, BSB <sub>5</sub> , elektrische Leitfähigkeit, pH, Ammonium
Abluft	Maissilage: CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> Restabfälle: TOC, Ammoniak, Gesamtstaub, Salzsäure

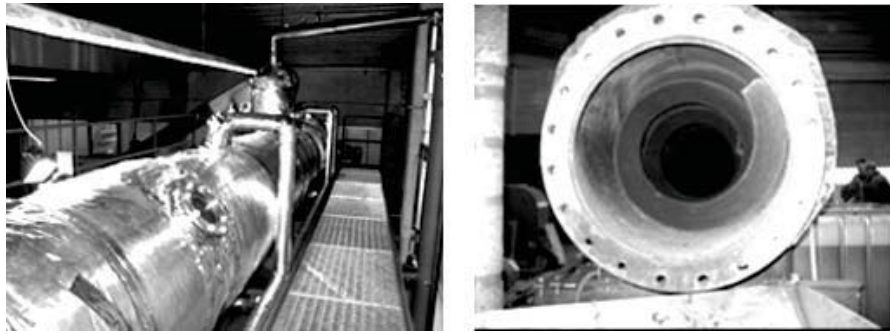


Abbildung 5.7: Großtechnische Versuchsanlage: Vakuum-Siede-Reaktor und Innenraum des Reaktors mit Schneckenförderer

### 5.1.3 Großtechnische Versuchsanlage

#### Technische Beschreibung

Auf der Deponie Sansenhecken, Neckar-Odenwaldkreis, hat die Firma U-plus eine Versuchsanlage zur Vakuum-Siede-Behandlung errichtet, die in Zusammenarbeit mit der AWN (Abfallwirtschaftsgesellschaft des Neckar-Odenwald-Kreises mbH) betrieben wurde. Mit dieser Versuchsanlage konnten die ersten Untersuchungen des Vakuum-Siede-Trocknungsprozesses durchgeführt werden.

Die großtechnische Versuchsanlage besteht im Wesentlichen aus einem Vakuum-Reaktor mit einer Heizanlage, einer Vakuumpumpe und drei Kondensatoren. Der Vakuum-Reaktor weist einen Durchmesser von 70 cm und eine Länge von 800 cm auf (Abbildung 5.7). Bei jedem Versuchsdurchgang kann ein Substratumfang von ca. 600-800 kg getrocknet werden. Das Substrat wird während des Versuchs durch eine Schnecke mechanisch umgewälzt. Beladung und Entladung des Reaktors erfolgen ebenfalls durch den Schneckenförderer. Die Wärmezufuhr erfolgt über eine an der Außenwand des Reaktors angelegte Mantelheizung. Die Heizanlage wird durch Heizöl befeuert. Im Heizkessel wird Wasser erwärmt und durch Röhren in der Mantelheizung verteilt. Das Vakuum wird durch eine Wasserringvakuumpumpe über Stutzen am Reaktordach aufgebaut, wodurch auch die Brüden aus dem Reaktor abgeführt und zum ersten Kondensator weitergeführt werden. Der erste Kondensator hat die Funktion, schmutzige Kondensate (Grobpartikel sowie Schmutzstoffe) abzuscheiden, um die Vakuumpumpe zu schützen. Da die Vakuumpumpe mit Wasser betrieben wird, wurde ein zweiter Kondensator (Wärmetauscher I) vor der Pumpe installiert, um die restlichen Brüden zu kondensieren. Der dritte Kondensator (Wärmetauscher II) arbeitet im Kreis mit der Vakuumpumpe. Er wurde nach dem Kondensatvorlagebehälter (nach der Pumpe) eingesetzt, um weitere kondensierbare Anteile der Abluft

zur Vakuumpumpe rückzuführen (Abbildung 5.8).

Die großtechnische Versuchsanlage wird im Umlaufbetrieb betrieben, sodass das Substrat ständig in Bewegung ist und durch die Schnecke transportiert wird.

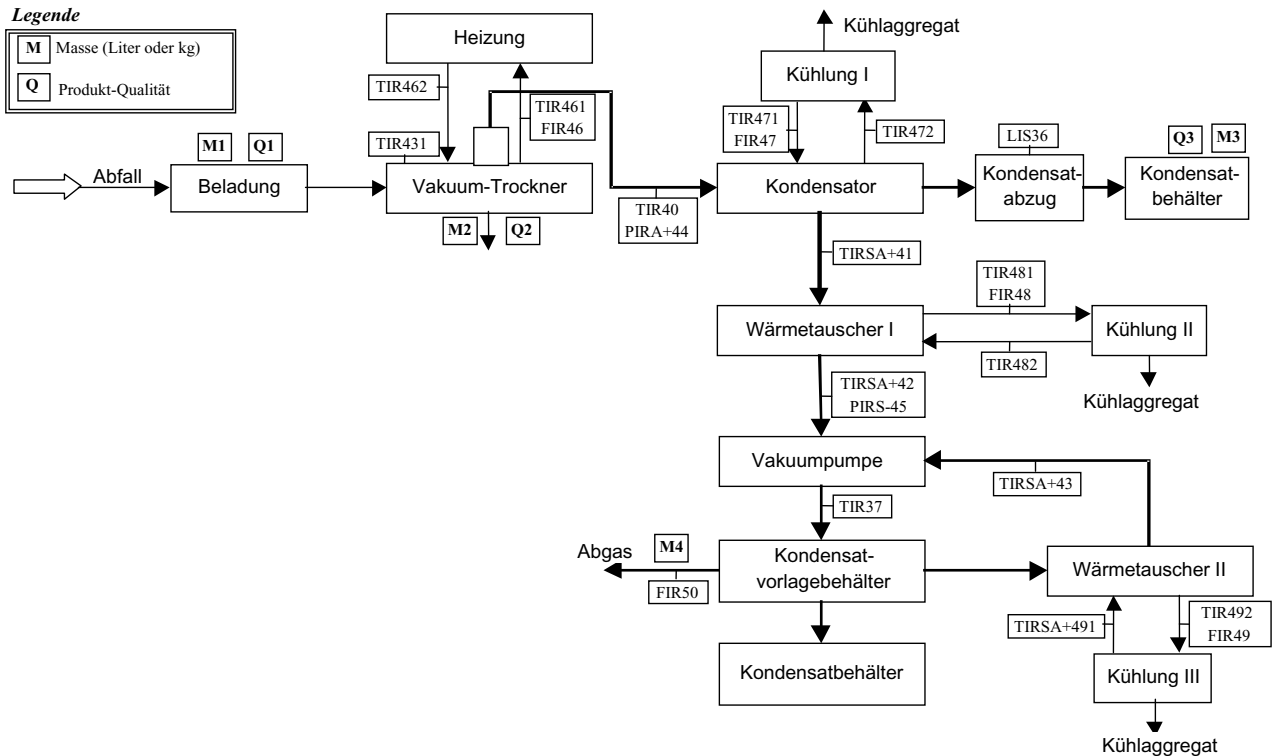


Abbildung 5.8: Fließbild der großtechnischen Versuchsanlage mit Mess- und Probenahmestellen

## Mess- und Probenahmestellen

Die Steuerung der großtechnischen Versuchsanlage erfolgt über ein Kontrollpanel am Schaltschrank der Anlage. Informationen aus der Anlagensteuerung werden in eine Datenbank auf einem Laptop übertragen. Die Daten der Versuche werden im 30 Sekunden-Takt in ein Datenblatt des Programms Microsoft Excel abgelegt und gespeichert. Die folgenden Parameter werden erfasst:

- Vorlauf-, Rücklauftemperatur und Durchsatz Heizwasser
- Vorlauf-, Rücklauftemperatur und Durchsatz der einzelnen Kühlung
- Temperatur Brüdenabzug
- Absoluter Druck Brüdenabzug
- Absoluter Druck Vakuumpumpe

- elektrischer Energieverbrauch der Gesamtanlage

Die Mess- und Probenahmestellen sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Probenarten sowie die Parameter, die durch Analyse bestimmt wurden, sind in der Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3: Arten der Probenahme und Analyse bei der großtechnischen Versuchsanlage

Probenart	Analysen
Substrat vor und nach Trocknung	TS
Kondensat	CSB

## 5.2 Untersuchte Substrate

### 5.2.1 Maissilage

Maissilage wurde als Substrat aufgrund ihrer höheren Homogenität und Verfügbarkeit verwendet. Die verwendete Maissilage wurde von der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) in Braunschweig bereitgestellt. Diese herkömmliche Silage wird an der FAL hergestellt und zur Fütterung von Milchvieh verwendet.

Abbildung 5.9 zeigt die Stückgrößenverteilung des Substrates Maissilage. Das gesamte Substrat besteht aufgrund von Zerkleinerung aus Material  $< 20$  mm. Der größte Anteil der Maissilage weist einen Durchmesser zwischen 4 mm und 8 mm auf. Maiskörner sind in Korngrößen  $< 4$  mm vorhanden, während Anteile wie Halme und Blätter in den höheren Korngrößenbereichen vorliegen [25]. Eine Schüttdichte von  $0,31 \text{ g/cm}^3$  wurde bestimmt.

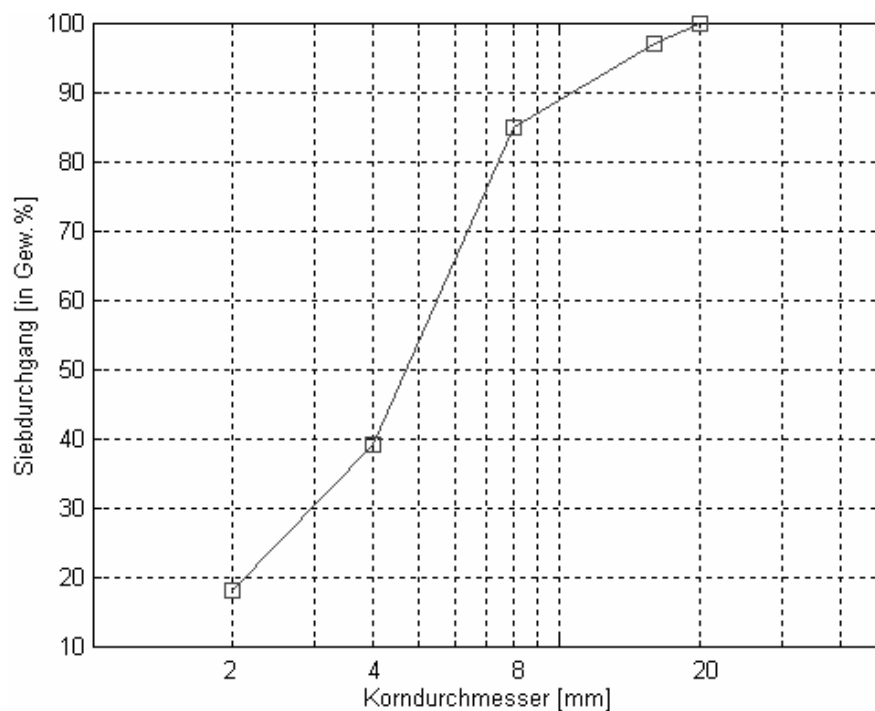


Abbildung 5.9: Stückgrößenverteilung von Maissilage

### 5.2.2 Restabfälle

Es wurden zwei verschiedene Restabfälle verwendet. In der großtechnisch Versuchsanlage wurde frisches Substrat abgesiebt auf  $< 60$  mm von der Deponie Sansenhecken im Neckar-Odenwaldkreis verwendet. In der halbertechnischen Versuchsanlage wurden frische Restabfälle aus der mechanischen Aufbereitung der MBA Südniedersachsen entnommen. Der Verfahrensschritt der mechanischen Aufbereitung besteht im Wesentlichen aus Zerkleinerung, Siebung und Eisen- sowie NE-Metallabscheidung. Die mechanische Aufbereitung trennt die Restabfälle in die in Abbildung 5.10 dargestellten Fraktionen. Nach der mechanischen Aufbereitung befindet sich etwa die Hälfte des Restabfalls in der Feinfraktion. Die untersuchte MBA behandelt in der mechanischen Aufbereitungsstufe Haus- und Gewerbeabfälle sowie Sperrmüllanteile zusammen. Den für die Versuche zur Vakuum-Siede-Trocknung verwendeten Abfällen wurde kein Sperrmüllanteil zugeführt. Geringe Reste von Sperrmüll wurden trotz aller Maßnahmen in einer Charge festgestellt.

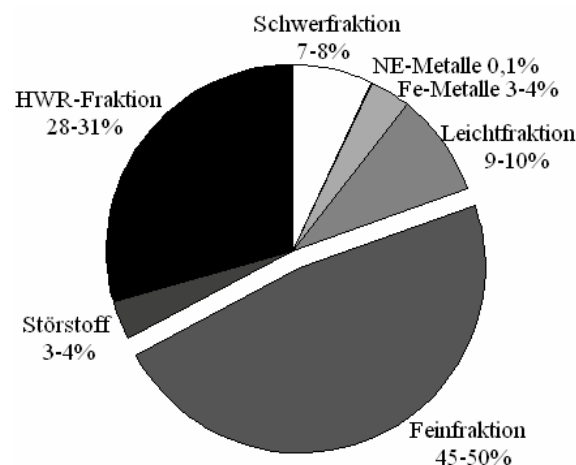


Abbildung 5.10: Zusammensetzung der mechanisch aufbereiteten Restabfälle

Das für die Versuchsreihen verwendete Substrat besteht aus der Feinfraktion der mechanischen Aufbereitung mit einer Dichte von ca.  $0,60 \text{ Mg/m}^3$ . Für diese Fraktion der MBA wurde eine Sieblinie erstellt. Abbildung 5.11 zeigt die Stückgrößenverteilung der Feinfraktion der mechanisch aufbereiteten Restabfälle. Die gesamte Feinfraktion besteht aus einer Stückgröße  $< 60$  mm. 90% des Materials wies eine Stückgröße von  $< 40$  mm auf. Der größte Anteil der Feinfraktion liegt zwischen 8 mm und 20 mm.

Diese Feinfraktion weist im Wesentlichen biologisch abbaubare Bestandteile des Restabfalls auf. Abbildung 5.12 stellt die TS-Gehalte sowie die Glühverluste (%) der gesamten Feinfraktion ( $< 60$  mm), der Fraktion zwischen 8 mm und 20 mm und der

Fraktion kleiner 8 mm dar. Der TS-Gehalt steigt mit abnehmender Korngröße, der Glühverlust nimmt dagegen ab. Die Fraktion  $< 8$  mm weist erwartungsgemäß den höchsten Anteil mineralischer Komponenten auf.

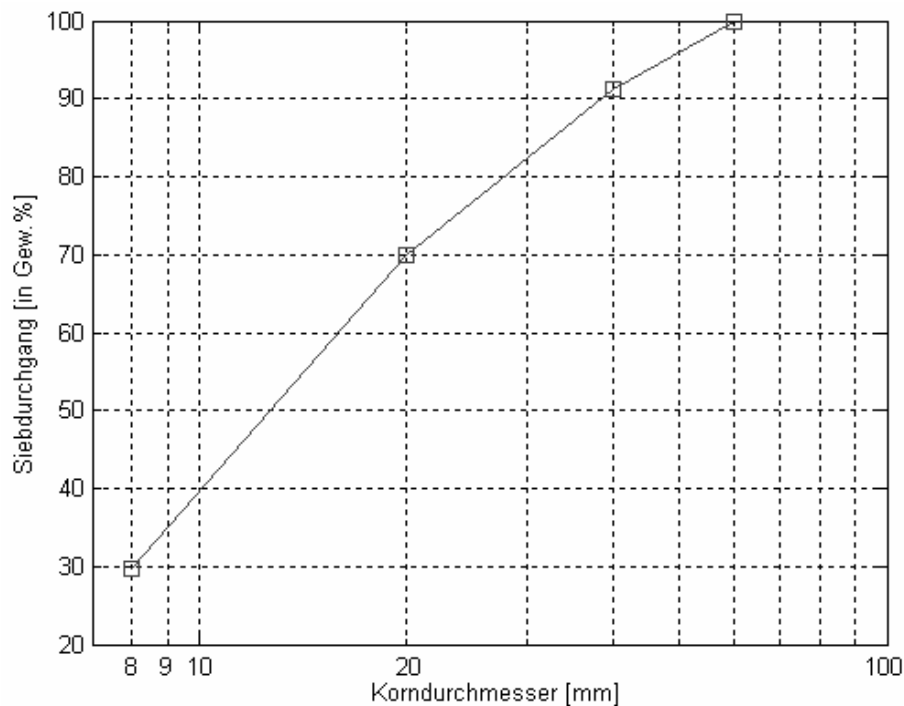


Abbildung 5.11: Stückgrößenverteilung der mechanisch aufbereiteten Restabfälle

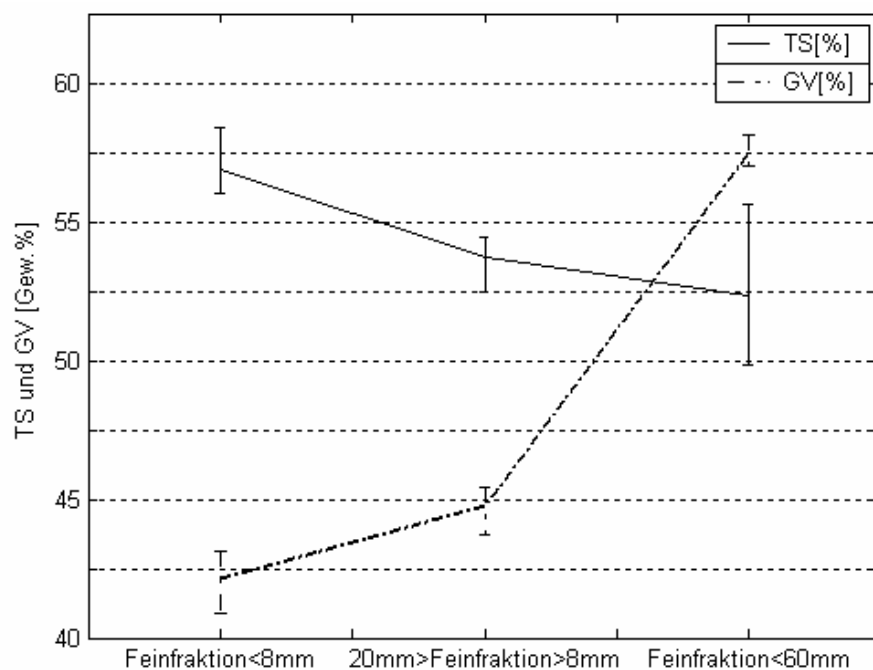


Abbildung 5.12: TS-Gehalt und Glühverlust der verschiedenen Fraktionen



### **5.2.3 Perkulationsrückstand aus der Perkulationsanlage Buchen**

Das zu trocknende Substrat besteht aus perkolierten und abgepressten Restabfällen der Perkulationsanlage der ISKA GmbH auf dem Entsorgungszentrum Sansenhecken, Buchen. Das Substrat wird auf  $< 60$  mm abgesiebt und auf einer Miete zwischengelagert und durch aeroben Abbau weiter biologisch abgebaut. Die Perkolation ist ein Vorbehandlungsverfahren von festen Abfallstoffen vor der Vergärung. Informationen über die Funktionsweise des Perkulationsverfahrens sind in Santen [67] zu finden.

### **5.2.4 Restabfälle nach der Vakuum-Siede-Extraktion**

Abgepresstes Output-Material des Vakuum-Siede-Extraktionsversuches wurde als zu trocknendes Substrat verwendet. Das zu extrahierende Material bestand aus Restabfällen des Entsorgungszentrums Sansenhecken, Buchen. Die Vakuum-Siede-Extraktion ist ein Behandlungsverfahren, bei dem durch eine gezielte Behandlung unter Vakuum und Wärme ein weitgehender Aufschluss der mittel- und schwerabbaubaren organischen Substanz erreicht werden kann. Detaillierte Informationen über die Funktionsweise der Vakuum-Siede-Extraktion sind in Bahr [2] und Liebeneiner [46] zu finden.

### 5.3 Analytik und Messmethoden

Die untersuchten Parameter und deren entsprechenden Analysemethoden, die in dieser Arbeit verwendet wurden, sind in Tabelle 5.4, Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 dargestellt. Die folgenden Analysen des Kondensats und des Feststoffs (Tabelle 5.4 und Tabelle 5.5) wurden im Labor des Leichtweiß-Instituts, Abteilung Abfallwirtschaft, der TU Braunschweig durchgeführt. Die Tabelle 5.6 stellt die Parameter und die entsprechenden Analysemethoden dar, die zur Abluftuntersuchung verwendet wurden.

Tabelle 5.4: Laboranalyseverfahren des Feststoffs

Parameter	Einheit	Analysemethode
Trockensubstanz (TS)	%	DIN 38 409-H1-1 [52]
Organische Trockensubstanz (oTS)	%	DIN 38 409-H1-3 [52]

Tabelle 5.5: Laboranalyseverfahren des Kondensats

Parameter	Einheit	Analysemethode
pH-Wert	-	DIN 38 404-C5 [52]
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	mg/l	DIN 38 409-H41 [52] mit Küvetten-Test der Fa. Dr. Lange Modell LCK514
Gesamtkohlenstoff (TOC)	mg/l	Schnelltest LCK381 der Fa. Dr. Lange
Elektrische Leitfähigkeit	mS/m	DIN EN 27888 [52]
Ammonium-Stickstoff	mg/l	mittels gassensitiver Elektrode
Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB <sub>5</sub> )	mg/l	DIN 38409-H51 [52]

Für das untersuchte Substrat „mechanisch aufbereitete Restabfälle“ wurde die Qualität der Abluft gemäß der TA Luft (24.7.2002) [55] für Anlagen zum Trocknen von Abfällen untersucht. Das Kondensat wurde nach dem Anhang 51 der Abwasserverordnung für Wasser aus der oberirdischen Ablagerung von Abfällen analysiert [56].

Tabelle 5.6: Abluftuntersuchung

Parameter	Einheit	Analysemethode
Gesamt Kohlenstoff (TOC)	ppm	durch Gesamt-Kohlenwasserstoff-Analysator RS 55-T mit Katalysator (Fa. Ratfisch; Messprinzip FID; beheizte Messgasleitung und -filter. Kalibrierung mit Synth. Luft (Nullpunkt) und 90 ppm Propan in Luft)
Ammoniak	ppm	mit Dräger-Kurzzeitröhrchen (Messbereiche 5-70 ppm)
Salzsäure	ppm	mit Dräger-Kurzzeitröhrchen (Messbereiche 1-10 ppm)
CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub>	Vol. %	durch Gaschromatographen GC-8A der Fa. Shimadzu

Das in den VDI-Richtlinien 2066 [51] beschriebene volumenbezogene gravimetrische Verfahren wird zur Analyse des Staubanteils verwendet. Aufgrund der Größe der Versuchsanlage wurde der Filterkopf direkt am Rohr angebaut. Die Masse des Staubes wird durch Differenzwägung des getrockneten und auf Raumtemperatur abgekühlten Filters vor und nach dem Versuch bestimmt. Die Abluft wird mittels eines Trockenturms zur Volumenbestimmung im Gaszähler entfeuchtet. Abbildung 5.13 stellt den Aufbau des Verfahrens vor.



Abbildung 5.13: Staubmessung nach VDI 2066

In Tabelle 5.7 sind die Messparameter bei der Laboranlage, der halb- und großtechnischen Versuchsanlagen beschrieben. Die Schaltschränke der halb- und großtechnischen Versuchsanlagen, die mit Steuer- und Regeleinrichtungen ausgestattet sind, wurden von der Firma DETRON AG hergestellt und geliefert.

Tabelle 5.7: Messparameter der Laboranlage, der halb- und großtechnischen Versuchsanlagen

	<b>Laboranlage</b>	<b>Halb- und großtechnische Versuchsanlagen</b>
<b>Temperatur</b>	Temperaturschrank: PT100 Temperatur; Temperatur Substrat: mittels in jedem Blech installierter Thermoelemente, die durch ein Sekundenthermometer GTH 1160 abgelesen werden	Substrat-, Reaktor-, Brudentemperatur werden von PT100 Messsensoren erfasst
<b>Druck</b>	durch Vakuum-Controller der Firma ILMVAC geregelt	halbtechnische Versuchsanlage: Vakuum-Controller VNC1 der Firma VACUUBRAND (Reaktor) und Vakuum-Controller der Firma ILMVAC (Kondensat); großtechnisch Versuchsanlage: 2 Draht-Messumformer 24 VDC
<b>Energieaufwand</b>	mittels Energiekostenmessgerät nach TÜV	durch elektronischen Energieverbrauchsähler der Marke ELCONTROL VIP ONE der Firma ELCONTROL-ENERGY
<b>Gewicht</b>	-	Die Gewichtserfassung während der Versuchsdurchführung wird nur bei der halbtechnischen Versuchsanlage ermittelt. Die Anlage liegt auf vier Messdosens Mod.300 der Firma UTICELL, die mit Messwandler DK910 der Firma MESOMATIC verbunden wurden

## 5.4 Versuchsvarianten

### 5.4.1 Laboranlage

Die Versuche wurden mit dem Substrat Maissilage durchgeführt. In Tabelle 5.8 ist die Versuchsplanung der Laboranlage aufgeführt. Prozesstemperaturen und Behandlungszeit wurden variiert. Temperaturen von 50, 70 und 105°C wurden eingesetzt. Das Substrat wurde maximal 120 Minuten behandelt, eine Trocknungsbehandlungszeit von Maissilage, die sich nach Jorczik [25] bewährt hat. Ein absoluter Druck von 50 mbar wurde wie in der großtechnischen Versuchsanlage in allen Versuchsvarianten eingesetzt. Die Versuchsplanung stellt neun Versuchsvarianten vor, die mit dreifacher Wiederholung durchgeführt wurden. Die ermittelten Ergebnisse aus der Laboranlage, die in Abschnitt 6.1 vorliegen, dienten als Grundlage zur Weiteruntersuchung des Verfahrens in der halbtechnischen Versuchsanlage.

Tabelle 5.8: Versuchsplanung der Laboranlage mit Maissilage

Versuch	Druck [mbar]	Schranktemperatur [°C ]	Zeit [h]
1-S	50	50	1
2-S	50	50	1,5
3-S	50	50	2
4-S	50	70	1
5-S	50	70	1,5
6-S	50	70	2
7-S	50	105	1
8-S	50	105	1,5
9-S	50	105	2

### 5.4.2 Halbtechnische Versuchsanlage

Zwei Substrate wurden untersucht, Maissilage und mechanisch aufbereiteter Restabfall. Maissilage wurde in zwei Phasen untersucht. Die Versuchsplanung der ersten Phase zeigt Tabelle 5.9. Hier wurde Maissilage 3,5 Stunden (ohne Vorerwärmung) bei 50, 70 und 105°C Heiztemperatur getrocknet. Jede Versuchsvariante wurde im Dreifachansatz durchgeführt.

Tabelle 5.9: Versuchsplanung Phase 1 der halbtechnischen Versuchsanlage mit Mais-silage

Versuch	Druck [mbar]	Temperatur [°C]
1-S-P1	50	50
2-S-P1	50	50
3-S-P1	50	50
4-S-P1	50	70
5-S-P1	50	70
6-S-P1	50	70
7-S-P1	50	105
8-S-P1	50	105
9-S-P1	50	105

Bei der Durchführung des Versuches 9-S-P1 (siehe Tabelle 5.9) wurde eine Undichtigkeit im Vakuum-Reaktor festgestellt (Auswertung siehe Abschnitt 7.2.1). Phase 2 beinhaltet die Wiederholung der Versuche mit den höheren Temperaturgradienten aus Phase 1 nach Abdichtung des Reaktors. In Phase 2 wurde das Substrat bei 70°C 7,5 Stunden und bei 105°C 5 Stunden behandelt (ohne Vorerwärmungszeit), wie in Tabelle 5.10 zu sehen ist. Eine Substratmenge von 40 kg konnte bei jedem Versuchsdurchgang verarbeitet werden.

Tabelle 5.10: Versuchsplanung Phase 2 der halbtechnischen Versuchsanlage mit Mais-silage

Versuch	Druck [mbar]	Temperatur [°C ]	Zeit [h]
1-S-P2	50	70	7,5
2-S-P2	50	70	7,5
3-S-P2	50	70	7,5
4-S-P2	50	105	5
5-S-P2	50	105	5
6-S-P2	50	105	5

Die Untersuchungsergebnisse, die bisher für Maissilage vorliegen, bilden eine geeignete Grundlage für die Untersuchung der Vakuum-Siede-Trocknung von Restabfällen. Die Temperaturgradienten aus den Versuchen mit Maissilage wurden übernommen und auch für das neue Substrat (mechanisch aufbereiteter Restabfall) verwendet. Die Betriebsführung bei 90°C wurde ergänzt (diese Temperatur entspricht genau der Abwärme von BHKWs, Aggregaten zur Verwertung von Gasen von Biogasanlagen und Mülldeponien, usw.) Auf die Versuche bei 50°C wurde bei diesen Untersuchungen verzichtet, da sich bereits in den Vorversuchen gezeigt hat, dass hier sehr hohe energetische Aufwendungen und lange Behandlungszeiten nötig waren, um den angestrebten TS-Gehalt zu erreichen.

Die Parameter Temperatur und Druck wurden, wie in Tabelle 5.11 dargestellt, variiert und der Einfluss der Trocknung bei verschiedenem Druck auf die Trocknungsgeschwindigkeit untersucht. Jeder Versuch wurde im Dreifachansatz durchgeführt. 40 kg mechanisch aufbereiteter Restabfall wurden als zu behandelnde Masse eingesetzt und eine Behandlungszeit von 3,5 Stunden wurde bei allen Versuchen verwendet. Die dargestellte Versuchsplanung wurde zweimal betrieben, sodass eine Anzahl von 54 Versuchen durchgeführt wurde.

Tabelle 5.11: Versuchsplanung halbtechnische Versuchsanlage mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen

Versuch	Druck [mbar]	Temperatur [°C ]
1-R	50	70
2-R	50	90
3-R	50	105
4-R	150	70
5-R	150	90
6-R	150	105
7-R	300	70
8-R	300	90
9-R	300	105

### 5.4.3 Großtechnische Versuchsanlage

Folgende Substrate wurden in der großtechnischen Versuchsanlage untersucht:

- entwässerter Perkulationsrückstand (Restabfälle),
- unbehandelter Restabfall,
- Restabfall nach Vakuum-Siede-Extraktionsbehandlung (VSE).

Die Temperatur der Mantelheizung sowie der Behandlungsdruck wurden bei allen Versuchen konstant bei 105°C bzw. 50 mbar gehalten (Tabelle 5.12).

Ca. 660 kg entwässerter Perkulationsrückstand und Restabfälle wurden behandelt, während für das Produkt aus der Extraktionsbehandlung eine Menge verarbeitet wurde, die nach der „Extraktion“ verfügbar war (siehe Abschnitt 6.3.1).

Tabelle 5.12: Versuchsplanung großtechnische Versuchsanlage

<b>Materialvarianten</b>	Restmüll, entwässerter Perkulationsrückstand	Restmüll	Restmüll nach VSE 1	Restmüll nach VSE 2
<b>Temperatur [°C]</b>	105	105	105	105
<b>Druck [mbar]</b>	50	50	50	50

Aufgrund der großen Menge an Substrat und der langen Dauer, um einen Versuch durchzuführen, und dem damit verbundenen Kostenaufwand, wurden die Versuche zur Untersuchung der verschiedenen Substrate nur einfach angesetzt.



## 5.5 Auswertungsmethoden - Statistik und Fehlerbetrachtung

Zur statistischen Beurteilung wurde eine mehrfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt [30]. Die Berechnungen erfolgten mit dem Programm Statistica Version 5.0. Diese Analyse wurde nur für die halbtechnische Versuchsanlage mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen durchgeführt, da diese Versuchsreihe die detaillierteste aller durchgeführten Untersuchungen ist.

Die Variation der Faktoren (Temperatur und absoluter Druck) ist statistisch signifikant ( $p < 0,01$ ). Die Variation zwischen den einzelnen Versuchen der Mehrfachansätze ist nicht signifikant ( $p > 0,05$ ).

Für die Versuchsergebnisse wurde ein Regressionsmodell formuliert (Abschnitt 7.2.6).



## Kapitel 6

# Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Versuche in der Laboranlage, in der halbtechnischen und großtechnischen Versuchsanlage wurden, wie in Abbildung 6.1, durchgeführt. Der Trocknungsprozess bestand hauptsächlich aus sieben Verfahrensschritten. Zu Beginn wurden die Anlagen auf die Behandlungstemperatur geheizt und mit dem Substrat befüllt. Die Anlagen wurden verschlossen und durch kontinuierlichen Betrieb der Vakuumpumpe bis auf den gewünschten absoluten Druck evakuiert. Während des Trocknungsprozesses wurde das Substrat auf Siedepunkttemperatur des angestrebten absoluten Druckes erwärmt und abhängig von Behandlungszeit und Temperatur die Oberflächen- und Innenfeuchtigkeit aus dem Substrat entfernt. Am Ende der Behandlungszeit wurde die Vakuumpumpe ausgeschaltet und das Vakuum in der Anlage durch Öffnung von Ventilen beendet. Anschließend wurde zur Ermittlung des Masseverlustes während des Prozesses das getrocknete Substrat aus der Anlage ausgetragen und gewogen. Zwei Fälle werden für die Anlage zur Ermittlung des Energieaufwandes betrachtet:

- Energie mit Vorerwärmung: beschreibt den Batch-Betrieb der Anlage, wobei die benötigte Energie, um den Reaktorkörper oder Vakuumschrank zu beheizen, enthalten ist.
- Energie ohne Vorerwärmung: beschreibt die Energie der Anlage bei einem kontinuierlichen Betrieb, wobei sich Reaktor und Vakuumschrank auf Betriebstemperatur befinden.



Abbildung 6.1: Versuchsdurchführung bei der Laboranlage, der halbtechnischen und großtechnischen Versuchsanlage

Im Folgenden werden weitere Informationen über die Versuchsdurchführung einzelner Anlagen sowie die Versuchsergebnisse präsentiert.

## 6.1 Laboranlage

Es wurden Versuchsreihen mit Maissilage als Substrat in einem Vakuumtrockenschrank durchgeführt. Prozesstemperaturen und Behandlungszeit wurden wie in Tabelle 5.8 variiert. Ein absoluter Druck von 50 mbar wurde in allen Varianten eingesetzt.

Die unteren drei der vier Trockenbleche wurden jeweils mit 200 g Maissilage befüllt (600 g pro Versuch), da diese ungefähr gleiche Trocknungsbedingungen aufweisen. Das oberste Blech wies aufgrund des Fehlens eines fünften Blechs höhere Wärmeabstrahlungsverluste auf. Ein eingewogenes Stück Aluminiumfolie wurde auf die Trockenbleche gelegt, um Verkrustungen auf den Blechen zu vermeiden sowie den Transport des Trockensubstrates zu vereinfachen. Die Bleche wurden mit einer ca. 1 cm dicken Schicht des zu trocknenden Substrates beschickt. Thermoelemente wurden in das Substrat jedes einzelnen Bleches gelegt, um die Substrattemperatur zu verfolgen. Nach Verschließung des Schrankes wurde die Vakuumpumpe angeschaltet und der Schrank dadurch evakuiert. Am Ende des Versuches wurde das Vakuum im Schrank aufge-

hoben und das Substrat auf Zimmertemperatur abgekühlt, um es anschließend zu wiegen. Des Weiteren wurde die Menge des gebildeten Kondensats bestimmt.

Die Vorerwärmungsenergie des Vakuumschranks (bei einer Raumtemperatur von 21°C) ist in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1: Erforderliche Energiemenge zur Erwärmung des Schranks

	Vorerwärmungsenergie Schrank [kWh]
50°C	0,16
70°C	0,25
105°C	0,40

### 6.1.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Trocknungsrate (TS Gew.-%) sowie des spezifischen Energieaufwands (Wh/g verdampften Wassers) der Versuche sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Der TS-Gehalt zu Versuchsbeginn der behandelten Maissilage befand sich bei 32 Gew.-%.

Bei konstantem absoluten Druck beschleunigt die Erhöhung der Temperatur erwartungsgemäß den Trocknungsprozess. Darüber hinaus kann der spezifische Energiebedarf reduziert werden. Die Versuche bei 105°C stellen die günstigste Variante dar, mit einem spezifischen Energieaufwand (ohne Vorerwärmungsenergie) von 6,15 Wh/g verdampftes Wasser und einem TS-Gehalt von 87,3 Gew.-% zu Versuchsende.

Die Kondensate, die mit dem Abscheider und mit der Kondensatfalle der Vakuumpumpe aufgefangen wurden (siehe Abbildung 5.2), wurden getrennt analysiert. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) und der gesamte organische Kohlenstoff (TOC) sind in Abbildung 6.3 aufgetragen. Es konnte keine eindeutige Temperaturkorrelation bezüglich der Kondensatqualität festgestellt werden.

Der größte Teil der Kondensatmenge wurde im Abscheider aufgefangen (Abbildung 6.4). Die gemessenen CSB- und TOC-Werte im Abscheider sind höher als in der Kondensatfalle, da sich im Abscheider Grobpartikel (Schmutzstoffe) ansammeln. Die CSB- und TOC-Werte der Silagekondensate im Abscheider liegen bei 16033-23033 mg/l bzw. 8033-10533 mg/l, während sie in der Kondensatfalle bei 10000-11516 mg/l bzw. 6075-6800 mg/l liegen.

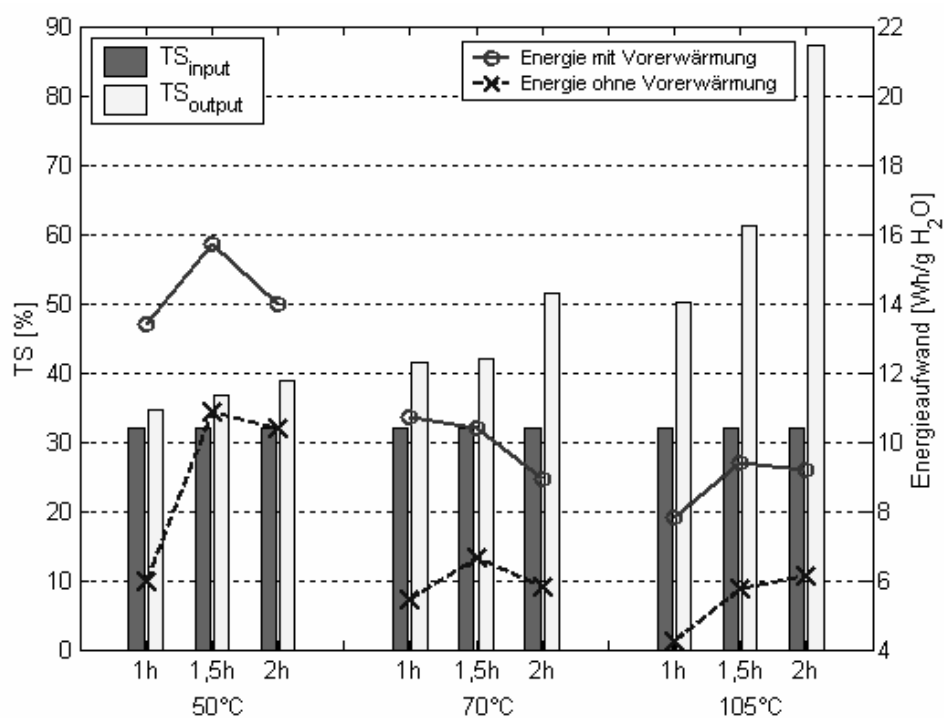


Abbildung 6.2: Trockensubstanz und spezifischer Energieaufwand des Substrats - Laboranlage

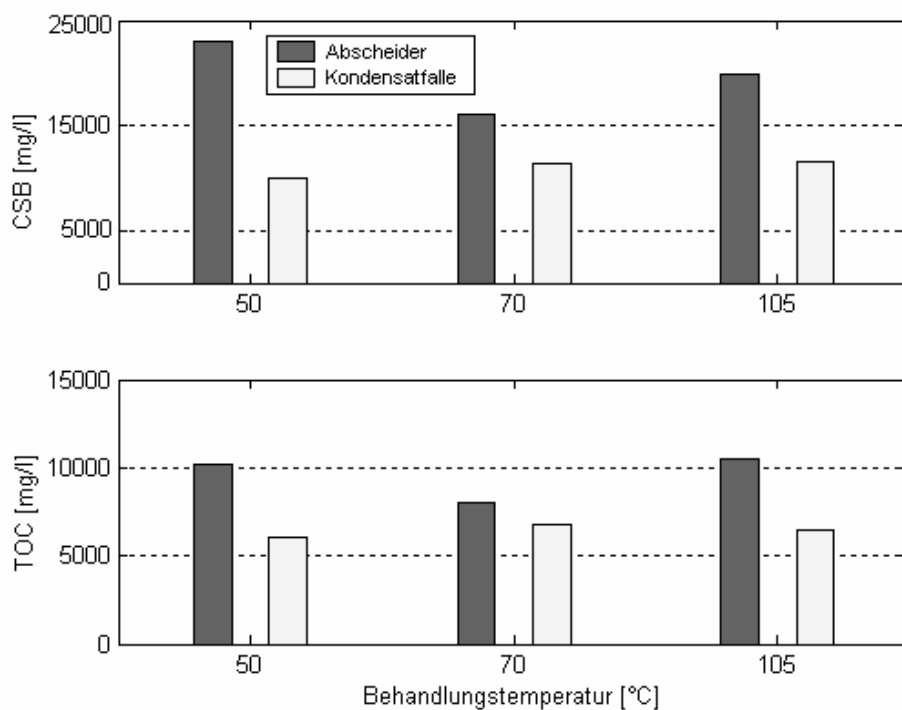


Abbildung 6.3: CSB- und TOC-Konzentrationen im Kondensat (Mittelwert)

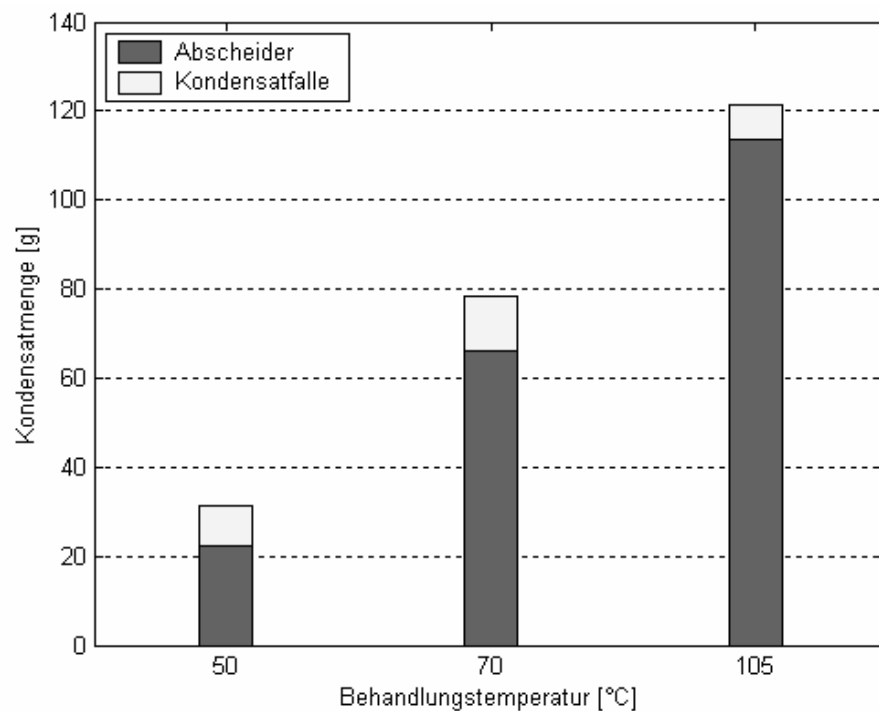


Abbildung 6.4: Aufgefangene Kondensatmengen im Abscheider und in der Kondensatfalle (Mittelwert)

Die pH-Werte liegen in dem sauren Bereich, wobei die Werte in der Kondensatfalle niedriger sind als im Abscheider (Abbildung 6.5). Da pH-Werte nicht immer eine Korrelation zu CSB darstellen, kann ein solches Verhalten nicht mit den untersuchten Analysen erklärt werden.

In Abbildung 6.6 ist für alle Behandlungstemperaturen aus den jeweiligen Mittelwerten eine Massenbilanz erstellt worden. Wie erwartet nimmt der Anteil, der über die Dampfphase das System verlässt mit steigender Temperatur zu, sodass der verbleibende Anteil an Reststoff (Wasser + Substrat) entsprechend abnimmt. Bei 105°C gab es eine Massenreduktion des Reststoffes von ca. 65 %.

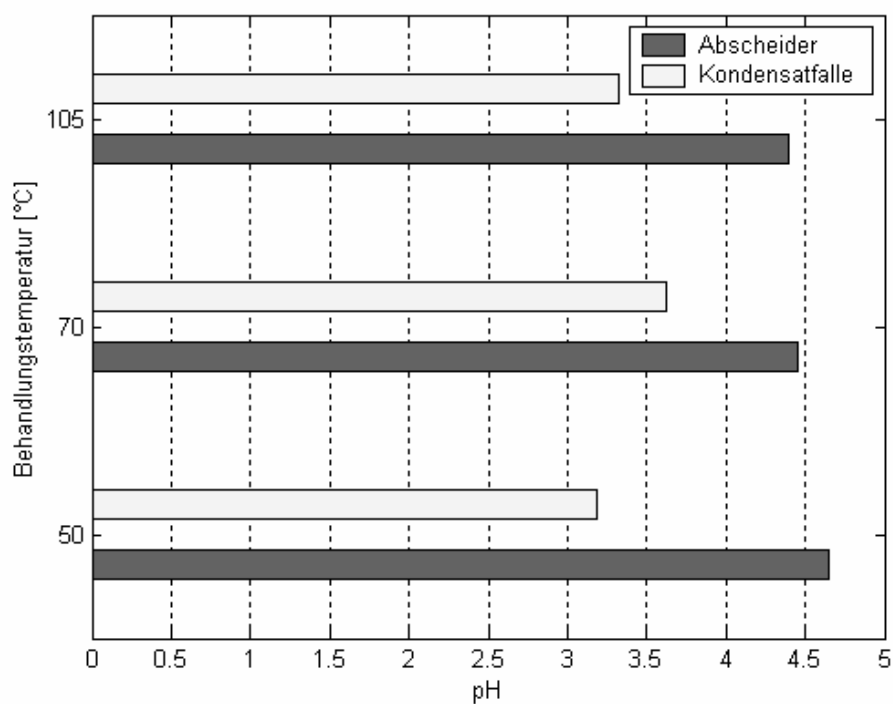


Abbildung 6.5: pH-Werte der bei der Maissilagetrocknung angefallen Kondensate (Mittelwerte)

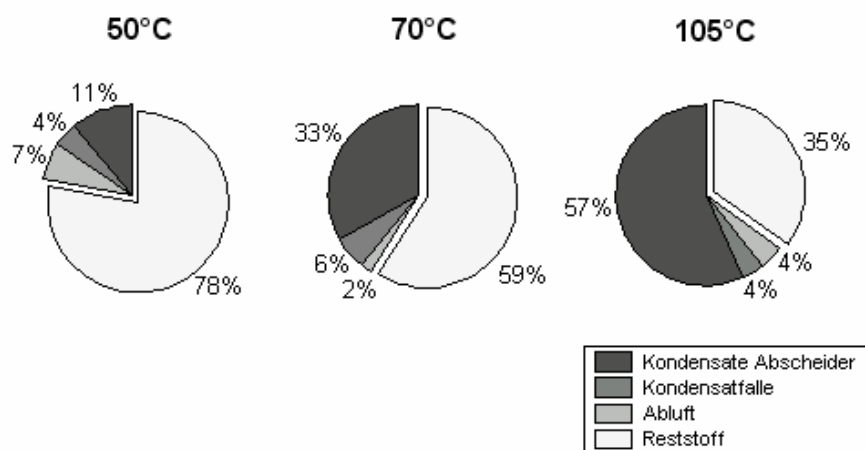


Abbildung 6.6: Massenbilanz der Maissilagetrocknung (Mittelwert)



Sowohl das Heizsystem im Vakuumschrank als auch die Vakuumpumpe sind elektrisch betrieben. Wie aus Abbildung 6.7 ersichtlich, benötigt die Heizung des Vakuumschranks die meiste Energie. Ohne Betrachtung der Vorerwärmungsenergie des Schrankes sind bei einer Behandlungstemperatur von 50°C die aufzuwendenden Energien für beide Anteile identisch.

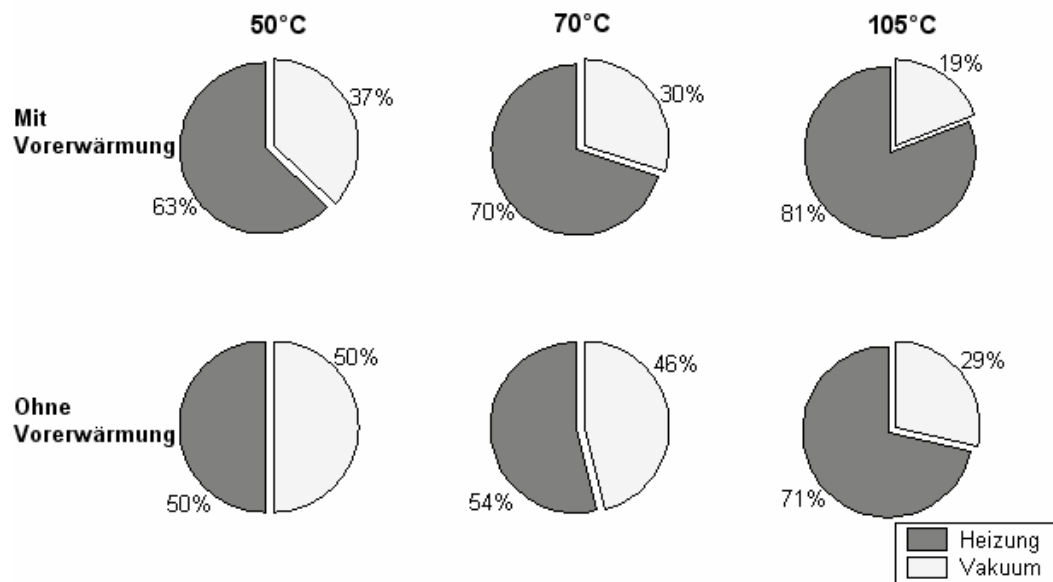


Abbildung 6.7: Energiebedarf für die einzelnen Teile der Laboranlage

## 6.2 Halbtechnische Versuchsanlage

### 6.2.1 Vorversuche

Es wurden zwei Vorversuche im Vakuumtrocknungsreaktor durchgeführt, um die Funktionsweise der einzelnen Anlagenteile und Prozessparameter wie Behandlungszeit, Mantelheizungstemperatur, Absolutdruck und Energieaufwand zu untersuchen sowie einzelne Anlagenteile zu eichen.

Als Substrat wurde eine Mischung aus frischen und gepressten Bioabfällen und gepresste Maissilage (Trockensubstanzgehalt (TS) = 36,7 Gew.-%) eingesetzt. Der erste Versuch wurde mit maximaler Pumpenleistung (Solldruck von 50 mbar), einer Mantelheizungstemperatur von 90°C und zwei Stunden Behandlungszeit durchgeführt. Der zweite Versuch wurde unter atmosphärischem Druck (ohne Vakuum), einer Mantelheizungstemperatur von 105°C und ebenfalls mit zwei Stunden Behandlungszeit durchgeführt.

Abbildung 6.8 zeigt für die beiden Versuche die erreichte Trockensubstanz und den Energieaufwand der Anlage ohne die Energie zur Vorerwärmung des Reaktorkörpers. Nach zwei Stunden Trocknung konnte ein TS-Gehalt von 60 Gew.-% mit einem Energieaufwand von 18,97 kWh (Vorerwärmungsenergie: 5,6 kWh) erreicht werden. Der Versuch ohne Vakuum weist einen niedrigeren Energieaufwand (14,26 kWh und Vorerwärmungsenergie: 7,5 kWh) auf, aber es wurde nur ein TS-Gehalt von 43 Gew.-% erreicht. Bei den Versuchen ohne Vakuum fand kein Luftaustausch statt, die verdampfende Flüssigkeit kann nur durch kleine Ventile am Reaktor entweichen. Es wurde nur eine Kondensatmenge von 0,5 Liter aufgefangen, der Rest kondensierte im Reaktor. Bei dem Versuch mit Vakuum konnten dagegen 12,5 Liter Kondensat zurückgewonnen werden.

Die Behandlungszeit von zwei Stunden bei 90°C hat sich als ungenügend herausgestellt, um ein Substrat mit Sekundärbrennstoffqualität ( $TS \geq 85$  Gew.-%) herzustellen. Deswegen wurde bei der weiteren Versuchsplanung eine längere Behandlungszeit sowie eine höhere Mantelheizungstemperatur vorgesehen. Analysen der Abluft hinsichtlich Sauerstoff-, Stickstoff-, Kohlendioxid- und Methankonzentration ergaben Ergebnisse ähnlich der Umgebungsluft.

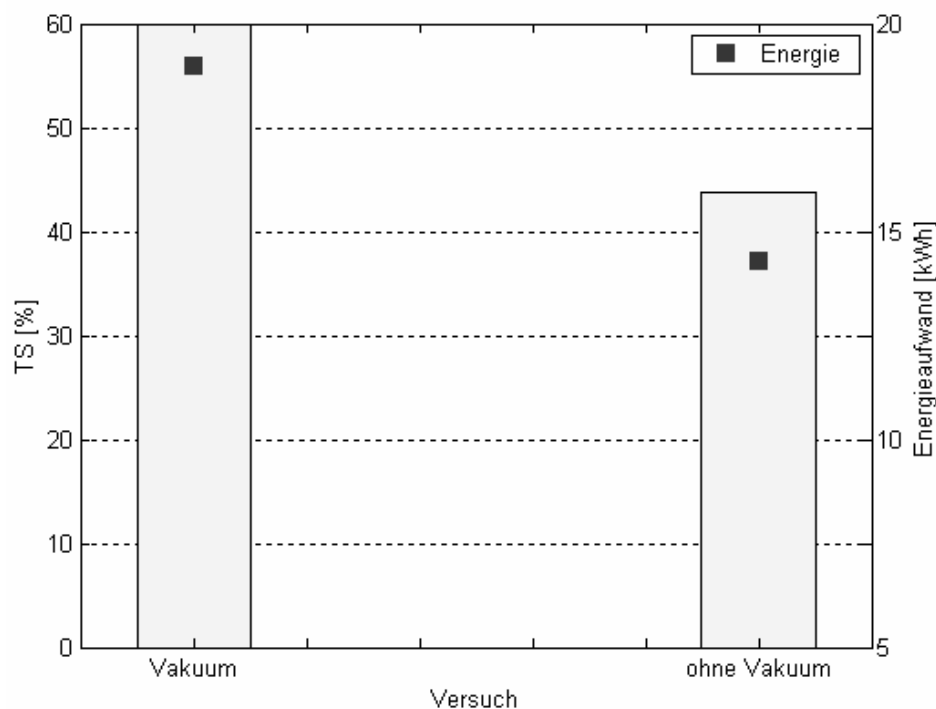


Abbildung 6.8: Trockensubstanz des Substrats und Energieaufwand nach 2 Stunden Trocknung

### 6.2.2 Trocknung von Maissilage

Ausgehend von den beschriebenen Literaturwerten und Vorversuchen wurde die Versuchsplanung gemäß Tabelle 5.9 und Tabelle 5.10 durchgeführt.

Die Versuche wurden mit maximaler Pumpenleistung gefahren, um eine optimale Trocknungsgeschwindigkeit zu erzielen, d.h. im Vakuumcontroller wurden 50 mbar als Sollwert eingestellt. Eine Verkürzung der Behandlungszeit und somit eine Verminderung des Energieaufwandes sind dadurch zu erwarten. Die Temperatur wurde variiert. Folgende Versuche wurden in zwei aufeinander folgenden Phasen mit 40 kg Maissilage durchgeführt:

**Phase 1:** In dieser Phase wurden zwei Temperaturgradienten (Differenz von Mantelheizungstemperatur zur erforderlichen Siedetemperatur) untersucht: ein hoher ( $105^{\circ}\text{C}$ ) und ein niedriger ( $50^{\circ}\text{C}$ ) Temperaturgradient, definiert durch die Untersuchungen mit der Laboranlage. Auf diese Weise wurde ein breiter Messbereich erfasst. Abschließend wurde ein mittlerer Temperaturgradient untersucht.

**Phase 2:** Wie bereits erwähnt, wurde vor Beginn dieser Phase eine Undichtigkeit im Vakuumreaktor festgestellt. Phase 2 beinhaltet die Wiederholung der Versuche mit den besten Temperaturgradienten (Versuche mit den höchsten TS-Gehalten des

Outputmaterials) aus Phase 1 nach Abdichtung des Reaktors. Zur energetischen Betrachtung der Anlage wurden die Ergebnisse aus dieser Phase verwendet.

Im Verlauf der Versuche mit den mechanisch aufbereiteten Restabfällen wurde ein Fehler in der Messwerterfassung zum Energieverbrauch der Kältemaschine festgestellt. Um den tatsächlichen energetischen Aufwand zu ermitteln, wurde in einer Wiederholung der Versuchsreihe mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen ein Drehstromzähler an der Messstelle M4 (siehe Abbildung 5.4) eingebaut. Der energetische Aufwand der Kältemaschine für die Trocknung von Maissilage, der in dieser Arbeit vorgestellt wird, wurde mithilfe des Verbrauches aus den Versuchen mit Restabfällen berechnet. Bei den Versuchen aus Phase 1 wurde ein Energieverbrauch der Kältemaschine von 0,48 kWh/kg verdampftes Wasser angesetzt, da in dieser Phase die Behandlungszeit genauso lang wie bei Restabfällen war. Die Behandlungszeit der Versuche in Phase 2 betrug 5 Stunden bei 105°C Behandlungstemperatur und 7,5 Stunden bei 70°C Behandlungstemperatur. Das Substrat zeigte in dieser Phase einen höheren Trockensubstanzgehalt nach der Trocknung als in Phase 1. Es ist zu vermuten, dass in dieser Phase die Kältemaschine einen höheren Energieverbrauch als 0,48 kWh/kg verdampftes Wasser hatte. Für die Versuche mit Restabfällen wurde für die Kältemaschine ein prozentualer Anteil an dem Gesamtenergieaufwand ermittelt (siehe Abbildung 6.36). Dieser Anteil an dem Gesamtenergieaufwand wurde auch für Phase 2 angesetzt.

Die Abbildungen und Tabellen zur energetischen Betrachtung stellen zwei Fälle dar: „Energie mit Vorerwärmung“ und „Energie ohne Vorerwärmung“. Die Vorerwärmungsenergie, die erforderlich ist, um die Mantelheizung bei einer Ausgangstemperatur von 14°C aufzuheizen, ist in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2: Energie zum Aufheizen der Mantelheizung

	Vorerwärmungsenergie [kWh]
50°C	1,66
70°C	3,50
105°C	7,50

## Ergebnisse der Versuche

**Trocknung von Maissilage - Phase 1:** Die Versuchsplanung dieser Phase wurde schon in Tabelle 5.9 vorgestellt. Die Silage wurde 3,5 Stunden (ohne Vorerwärmung) bei 50°C, 70°C und 105°C Heizmitteltemperatur getrocknet. Jeder Trocknungsversuch wurde im Dreifachansatz durchgeführt.

Der TS-Gehalt der verwendeten Maissilage variiert zwischen 28 und 40 Gew.-%. In dieser Versuchsphase wurde Maissilage mit 37,3 Gew.-% TS (erste Versuche bei 50°C und alle bei 105°C) und 31 Gew.-% TS (die zweiten und dritten Versuche bei 50°C und alle anderen bei 70°C) behandelt. Solche Schwankungen sind bei Naturprodukten üblich. Die Verwendung einer einzigen Charge für alle Versuche war aufgrund der Verderblichkeit von Maissilage nicht möglich.

In Abbildung 6.9 sind für alle Versuche die Trockensubstanzgehalte des Input- und Outputmaterials sowie der Energieverbrauch der Anlage aufgetragen. Die Versuche bei 105°C konnten die höchsten TS-Gehalte ( $TS_7 = 85,4$  Gew.-%,  $TS_8 = 81,6$  Gew.-% und  $TS_9 = 83,5$  Gew.-%) im Output erreichen. Der erste Versuch bei 50°C ergab einen etwa 20% höheren TS-Gehalt als die zwei Wiederholungsversuche, was durch einen 17% höheren Inputwassergehalt bedingt ist. Die verdampften Wassermengen zeigen hingegen nur eine sehr kleine Variation auf, wobei während der ersten Durchführung eine Wassermenge von 5,8 l und während der beiden Wiederholungen eine Wassermenge von ca. 6,2 l verdampft wurde.

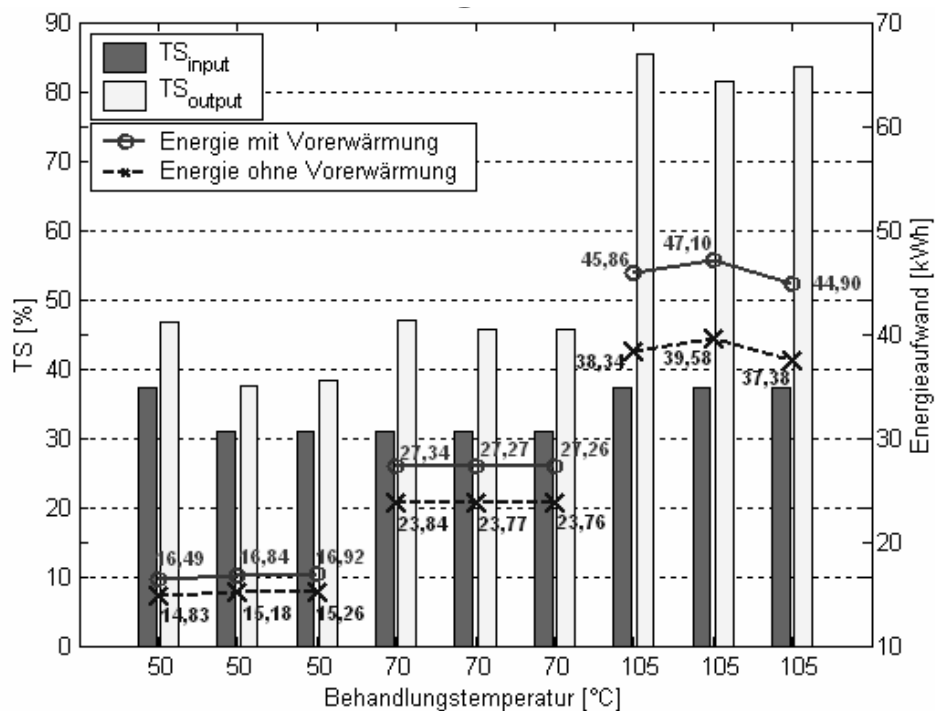


Abbildung 6.9: Trockensubstanzgehalt und Energieaufwand des Substrates nach 3,5 Stunden Trocknungszeit - Silage Phase 1

Da der Energieaufwand selbst keine direkte Aussage über die Energieeffizienz der Versuche gibt, sind in Abbildung 6.10 die Mittelwerte des spezifischen Energieaufwandes pro kg verdampftes Wasser sowie der Trockensubstanzgehalt bei jeder Behandlungstemperatur dargestellt. Bei den Versuchen bei 50°C, in dem Substrate mit unterschiedlichen TS-Gehalten verwendet wurden, sind nur die Mittelwerte von dem erreichten TS-Gehalt der Versuche 2 und 3 (mit gleichem TS-Gehalt des Inputs) in dieser Abbildung dargestellt.

Die Versuche bei 50°C weisen den höchsten spezifischen Energiebedarf auf (2,28 kWh/kg verdampftes Wasser). Mit einem spezifischen Energiebedarf von 1,78 kWh/kg verdampftes Wasser stellen die Versuche bei 105°C die beste Energieeffizienz dar.

Der Trocknungsverlauf über die Behandlungszeit der beiden Versuche mit höheren Trocknungsraten (70°C und 105°C) ist in Abbildung 6.11 aufgetragen, die Menge an kondensiertem Wasser über die Behandlungszeit in Abbildung 6.12. Die Trocknungsraten sind erwartungsgemäß durch Erhöhung der Behandlungstemperatur gestiegen und ca. doppelt so groß. Die Behandlungstemperatur bei 105°C ergab eine Verdampfungsrates von ca. 5 bis 7 kg H<sub>2</sub>O/h, während sie bei 70°C zwischen 2,7 und 4,5 kg H<sub>2</sub>O/h schwankt.

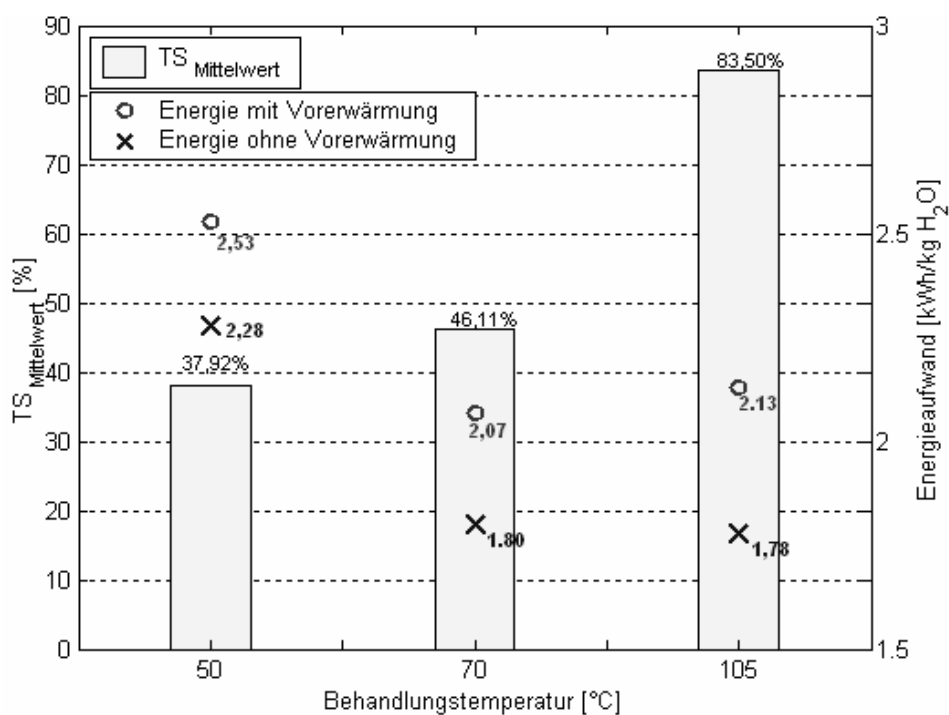


Abbildung 6.10: Mittelwerte des Trockensubstanzgehaltes und Energieaufwandes pro kg verdampftes Wasser - Silage Phase 1

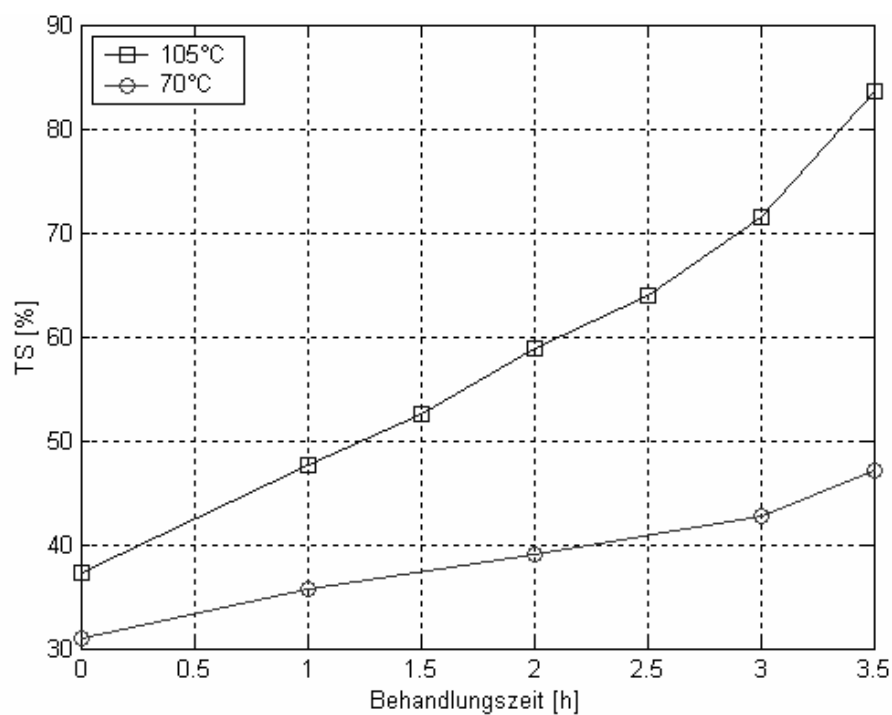


Abbildung 6.11: Trocknungsverlauf über die Behandlungszeit - Silage Phase 1

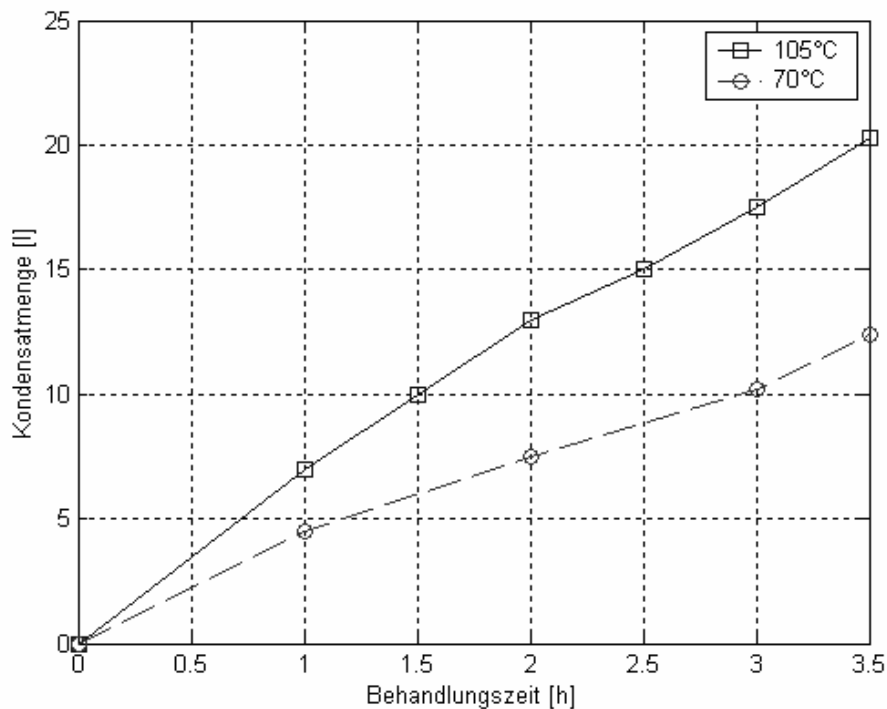


Abbildung 6.12: Menge an kondensiertem Wasser über die Behandlungszeit - Silage Phase 1

Die Mittelwerte der CSB- und TOC-Konzentrationen im Kondensat ist in Abbildung 6.13 dargestellt. Es zeigt sich, dass ab Temperaturen  $> 70^{\circ}\text{C}$  auch die Konzentrationen des CSB und TOC deutlich zunehmen. Die Konzentrationsunterschiede zwischen  $50^{\circ}\text{C}$  und  $70^{\circ}\text{C}$  sind hingegen nur sehr gering.

Zum Ende dieser Phase wurde festgestellt, dass der Reaktor mit zunehmender Undichtigkeit betrieben wurde. Ein Versuch bei  $70^{\circ}\text{C}$  konnte z.B. nur bei einem absoluten Druck von 98 mbar betrieben werden. In Phase 1 dieser Untersuchung konnte am Anfang dagegen ein absoluter Druck von 70 mbar erreicht werden. Die Undichtigkeit wurde am Übergang der Schnecke in den Reaktorraum lokalisiert. Durch die Drehbewegung der Schnecke sowie die Behandlungstemperatur kam es zu einem Verschleiß an dieser Stelle.

Es wurden weitere Versuche (Versuche Phase 2) durchgeführt, um mögliche Verfälschungen der bisherigen Versuche zu identifizieren. In Phase 2 wurde die Dichtigkeit der Anlage vor jedem Versuch überprüft. Es kam bei jedem Versuch zu einem minimalen Verlust an Dichtigkeit, der durch Zuführung von Fett auf die betroffene Stelle an der Schnecke behoben werden konnte.



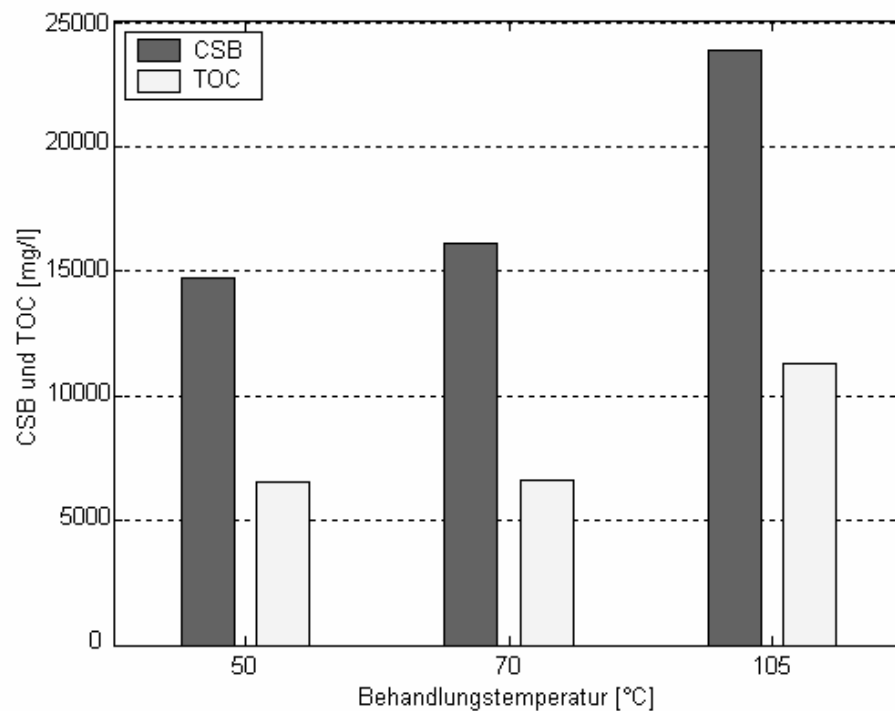


Abbildung 6.13: Mittelwerte der CSB- und TOC-Konzentrationen im Kondensat - Silage Phase 1

**Trocknung von Maissilage – Phase 2:** In dieser Phase wurde die Trocknung von Maissilage bei 70°C und 105°C nochmals untersucht. Da das Substrat eine hohe Feuchtigkeit aufwies, wurde die Behandlungszeit erhöht (Tabelle 5.10), um den gewünschten TS-Gehalt zu erreichen.

Da in den Versuchen der Phase 1 bei 70°C der gewünschte Trockensubstanzgehalt ( $\geq 85$  Gew.-%) nicht erreicht wurde, erfolgten diese Versuche mit verlängerter Behandlungszeit. Die Versuche bei 70°C müssen mindest 2 Stunden länger durchgeführt werden, um den gleichen Energieaufwand wie bei 105°C aufzuweisen. Durch Vergleich der erreichten Trocknungsraten beider Versuche wird die günstigere Variante ermittelt. Die Versuche bei 70°C wurden 7,5 Stunden und die bei 105°C 5 Stunden durchgeführt (ohne Vorerwärmungszeit).

Im Reaktor konnte in dieser Phase ein geringerer absoluter Druck als in Phase 1 erreicht werden, sodass bei den Versuchen bei 70°C ein absoluter Druck von 50 mbar während der gesamten Behandlungszeit erreicht werden konnte. Während der Versuche bei 105°C befand sich der absolute Druck in den ersten 3,5 Stunden ohne große Variation bei ca. 70 mbar (wie auch in Phase 1). In den letzten 1,5 h Behandlungszeit, wurde ein absoluter Druck zwischen 54 mbar und 50 mbar erreicht.

In den Versuchen 1, 2, 4 und 5 (siehe Tabelle 5.10) wurde Maissilage mit einem TS-Gehalt von 30,7 Gew.-% verwendet. Bei den Versuchen 3 und 6 lag der TS-Gehalt bei 28,7 Gew.-% (siehe Abbildung 6.14 und Tabelle 5.9). Diese kleine Variation des Trockensubstanzgehaltes ergab einen wesentlichen Einfluss auf den TS-Gehalt nach der Trocknung. Eine Erhöhung von 2% des TS-Gehaltes ergab eine Erhöhung von 8 bis 14% im Trockenoutput.

TS-Gehalte vor und nach Trocknung sowie die Energieaufwände der Anlage sind in Abbildung 6.14 dargestellt. Es wird deutlich, dass die gewählte Behandlungszeit ungenügend ist, um Maissilage mit einem TS-Gehalt von 28,7 Gew.-% auf Ersatzbrennstoffqualität zu konfektionieren. Die Versuche mit einem TS-Gehalt von 30,7 Gew.-% konnten im Trockenoutput TS-Gehalte größer als 80 Gew.-% erreichen. Aufgrund der Schwankung der Trockensubstanz wurden die Versuche in Abhängigkeit vom TS-Gehalt des Eingangsmaterials ausgewertet.

Die Behandlung bei 105°C ohne Vorerwärmungsenergie zeigt erwartungsgemäß trotz 2,5 Stunden kürzerer Trocknungszeit einen Energieaufwand im ähnlichen Bereich wie die Behandlung bei 70°C. Obwohl bei beiden Behandlungstemperaturen dem System fast die gleiche Menge an Energie zugeführt wurde, erreichten die Versuche bei 105°C einen höheren Trockenoutput als bei 70°C.

Aufgrund der Abweichung im TS-Gehalt wurden die spezifischen Energieaufwände der beiden unterschiedlichen Chargen getrennt ermittelt (Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16). Die Behandlung bei einer Temperatur von 105°C ohne Vorerwärmungsenergie wies einen niedrigeren Energieaufwand pro Kilogramm verdampftes Wasser auf als die Behandlung bei 70°C. Ein höherer Feuchtegehalt des Eingangsmaterials führte zu einem erhöhtem spezifischen Energiebedarf.

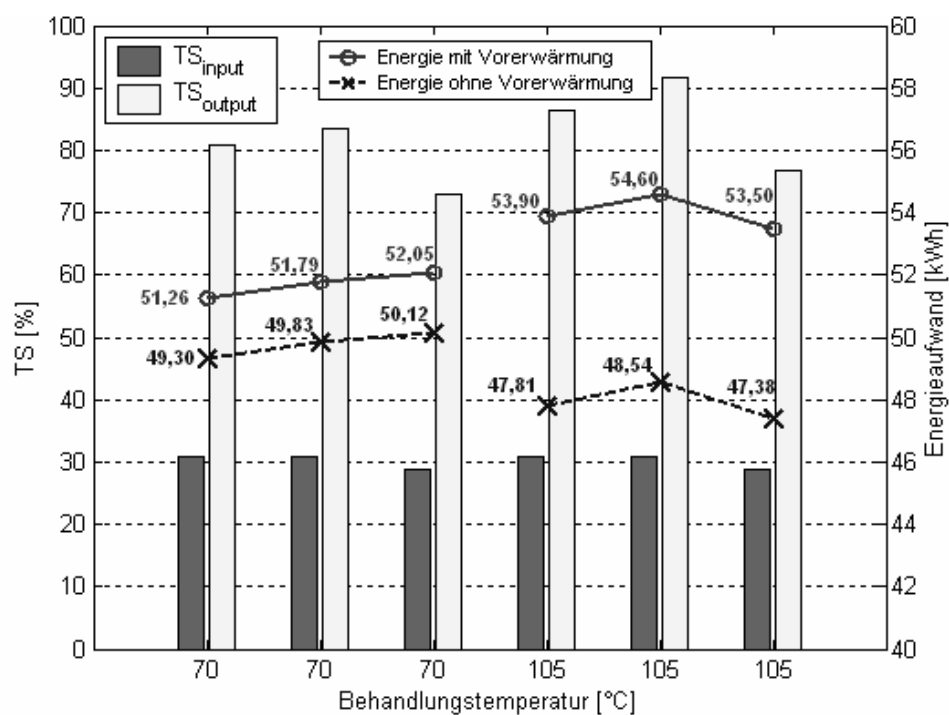


Abbildung 6.14: TS-Gehalt des Substrates und Energieaufwand des Versuches - Silage Phase 2

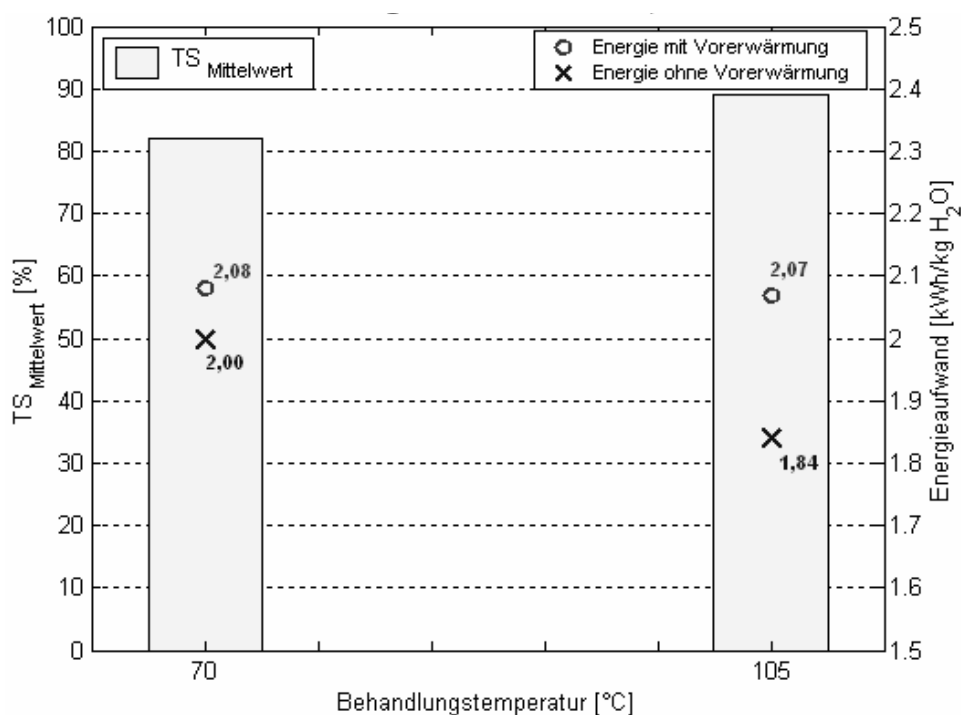


Abbildung 6.15: Mittelwert des TS-Gehalts des Substrates und Energieaufwand - TS 30,7% - Silage Phase 2

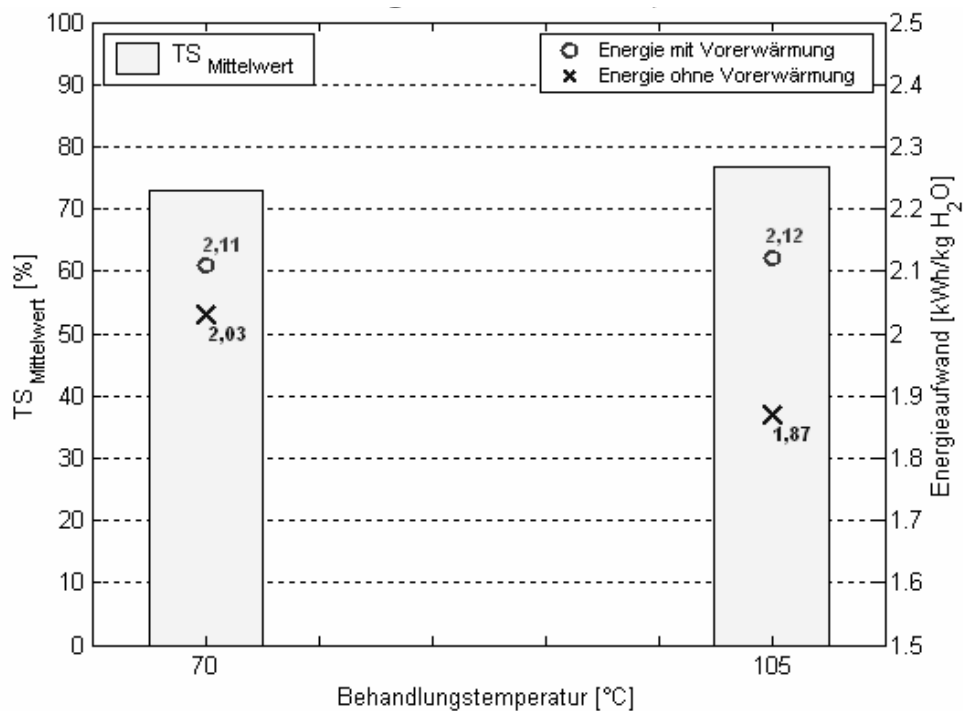


Abbildung 6.16: Trockensubstanz des Substrates und Energieaufwand - TS 28,7% - Silage Phase 2

Die Energie, um den Reaktor vor dem Prozess zu erwärmen, weist entscheidenden Einfluss auf die energetische Effizienz der Versuche auf, wie in Tabelle 6.3 zusammengefasst ist.

Der Trocknungsverlauf ist in Abbildung 6.17 und Abbildung 6.18 dargestellt. Erwartungsgemäß ergaben die Versuche bei 105°C (ca. 5-7 kg H<sub>2</sub>O/h), analog zu den Versuchen in Phase 1, höhere Trocknungsraten als die Versuche bei 70°C (ca. 3-4 kg H<sub>2</sub>O/h).

In Abbildung 6.19 und Abbildung 6.20 sind die Trocknungskurven (TS-Gehalt über spezifischem Energiebedarf) für die beiden untersuchten Temperaturen dargestellt. Die Zunahme der Bindungskräfte zwischen Wasser und Substrat während des Trocknungsverlaufes verursacht den steigenden spezifischen Energieaufwand um Flüssigkeiten zu verdampfen.

Die Menge an angefallenem Kondensat variierte bei den hier untersuchten Anfangswassergehalten nur minimal. Deswegen wurde für jede Behandlungstemperatur ein Mittelwert der Kondensatmenge berechnet. Abbildung 6.21 stellt den zeitlichen Verlauf der Kondensatmenge dar.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung des Energieaufwandes - Silage Phase 2

TS Input	Temperatur	ohne Vorerwärmungsenergie Heizung		mit Vorerwärmungsenergie Heizung		TS Output
		Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	
30,7%	70°C	49,57	2,00	51,53	2,08	82,1%
	105°C	48,17	1,84	54,25	2,07	89,0%
28,7%	70°C	50,12	2,03	52,05	2,11	72,8%
	105°C	47,38	1,87	53,50	2,12	76,8%

Die Massenbilanz ist für jede Behandlungstemperatur in Abbildung 6.22 dargestellt. Der Anteil der Brüden, der als Kondensat zurückgewonnen wurde, und der Anteil der Brüden, der über die Abluft abgegeben wurde, sind in dieser Abbildung zu erkennen. Eine höhere Kondensationsleistung des Systems wurde erreicht. Wie erwartet verlassen bei höherer Behandlungstemperatur mehr Brüden die Anlage über die Abluft. Eine Minimierung ist durch Optimierung des Kühlungssystems zu erreichen.

Der prozentuale Energieaufwand jeder Anlagenkomponente ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Die thermische Energie benötigt den größten Anteil der Gesamtenergie. Den zweitgrößten Anteil verbraucht die Kältemaschine, gefolgt von der Vakuumpumpe. Der Energieaufwand der Vakuumpumpe ist bei 70°C mit 13% der Gesamtenergie höher als bei 105°C (9%), da die Behandlungszeit bei 70°C länger ist.

Die Analysen der Abluft auf Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid und Methan ergaben Ergebnisse wie in der Umgebungsluft, da die Vakuumpumpe die Abluft ständig mit Umgebungsluft vermischt (siehe Abschnitt 5.1.2).

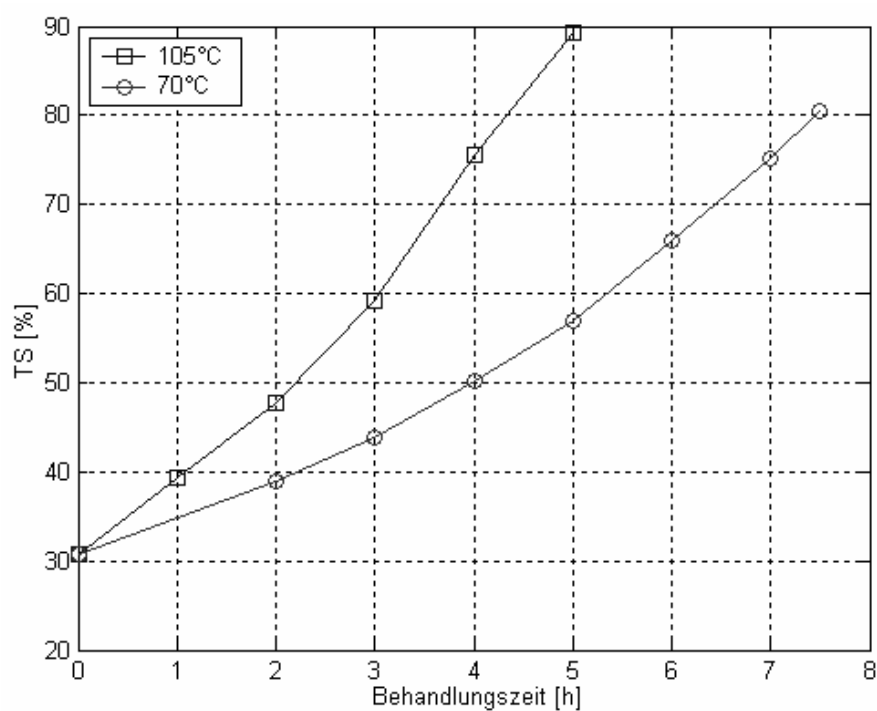


Abbildung 6.17: Trocknungsverlauf über die Behandlungszeit – TS 30,7% - Silage Phase 2

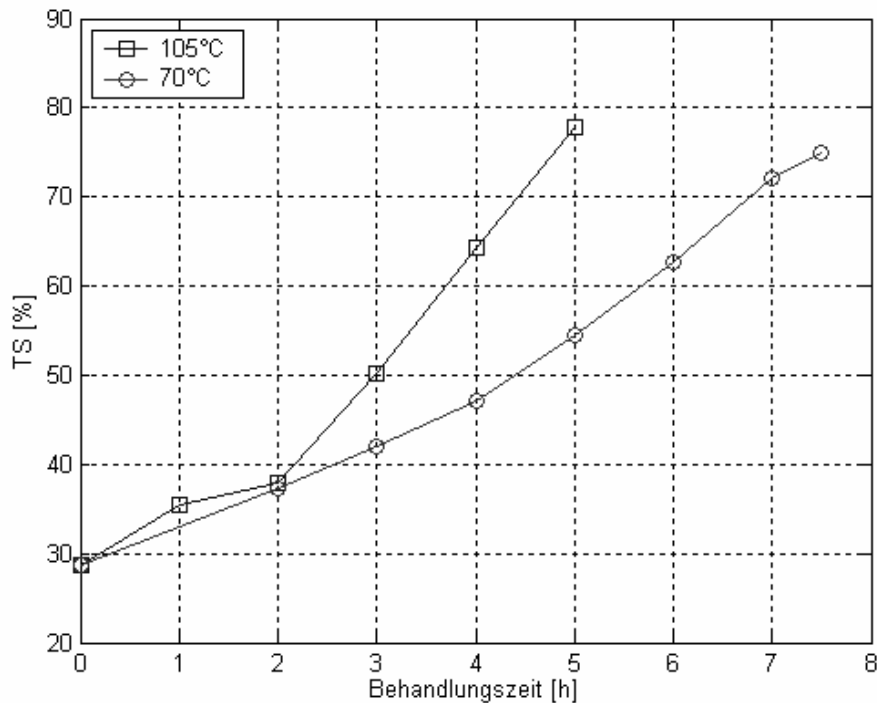


Abbildung 6.18: Trocknungsverlauf über die Behandlungszeit – TS 28,7% - Silage Phase 2

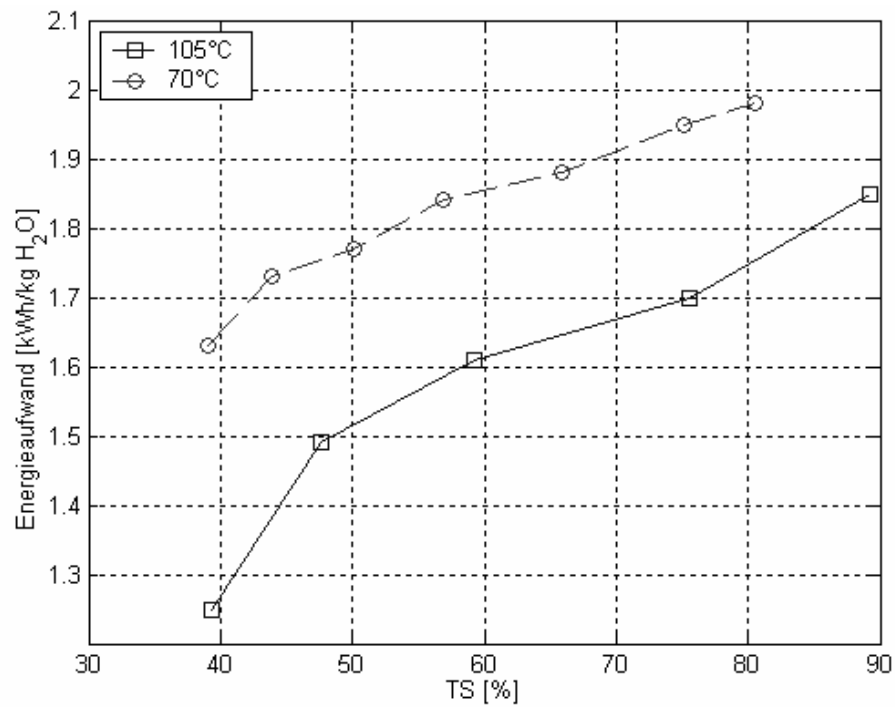


Abbildung 6.19: TS-Gehalt in Abhängigkeit von dem Energieaufwand - TS 30,7%  
(ohne Vorerwärmungsenergie) - Silage Phase 2

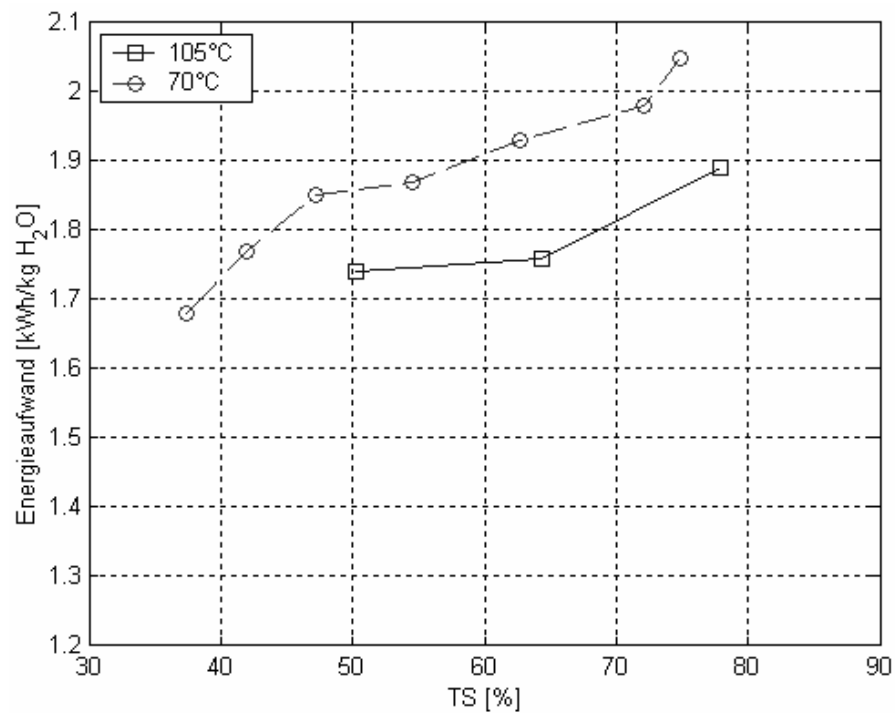


Abbildung 6.20: TS-Gehalt in Abhängigkeit von dem Energieaufwand - TS 28,7%  
(ohne Vorerwärmungsenergie) - Silage Phase 2

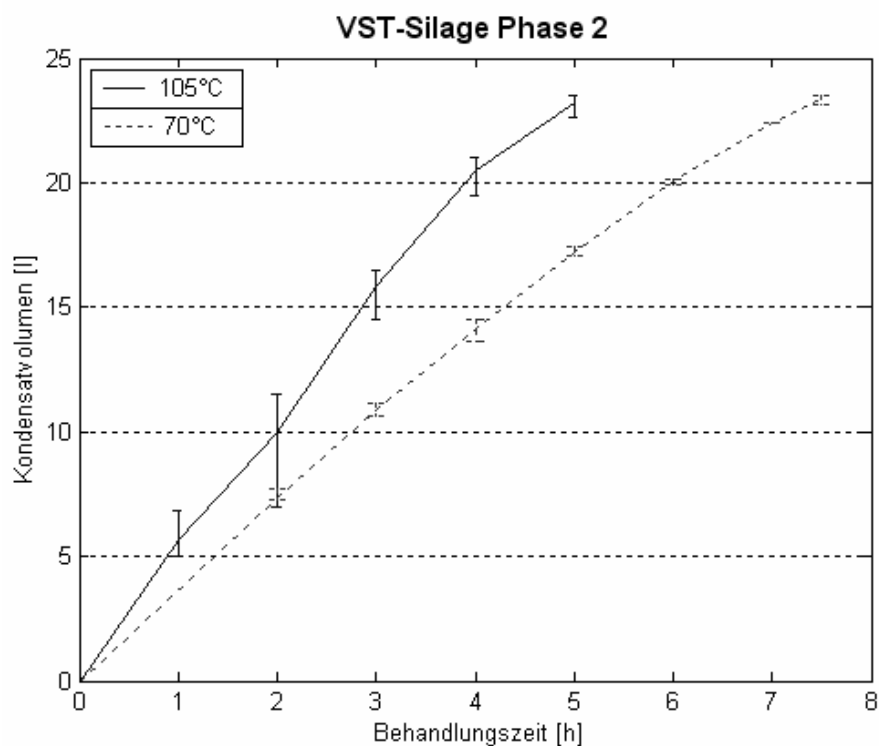


Abbildung 6.21: Zeitlicher Verlauf des Kondensatanfalls (Mittelwert) - Silage Phase 2

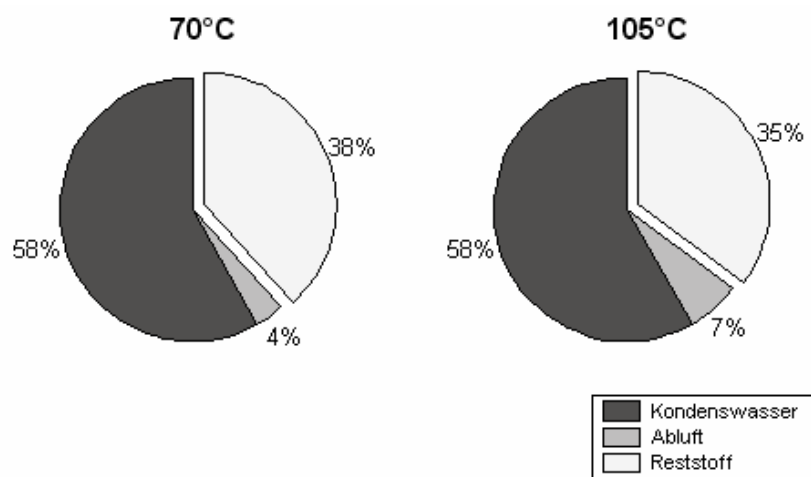


Abbildung 6.22: Mittelwert Massenbilanz für verschiedene Behandlungstemperaturen - Silage Phase 2



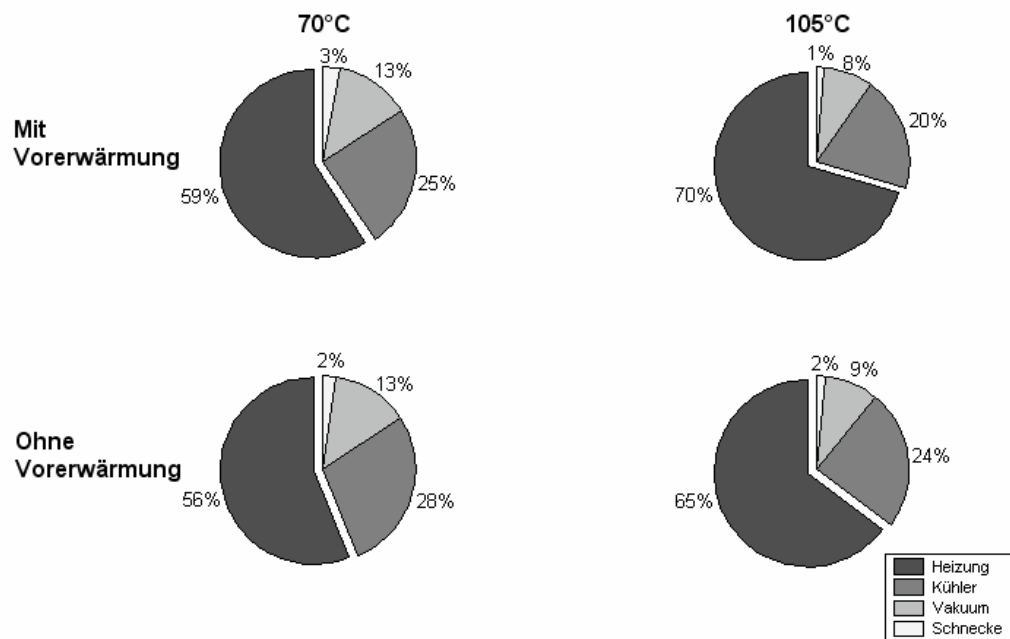


Abbildung 6.23: Energieaufwand der Anlage [%] - Silage Phase 2

### 6.2.3 Trocknung von mechanisch aufbereiteten Restabfällen

Die Untersuchungsergebnisse, die bisher für Maissilage vorliegen, bilden eine geeignete Grundlage für die Untersuchung der Vakuum-Siede-Trocknung von Restabfällen. Die Temperaturgradienten aus den Versuchen mit Maissilage wurden übernommen. Die Betriebsführung bei 90°C wurde ergänzt, da diese Temperatur genau der Abwärme von BHKWs entspricht. Auf die Versuche bei 50°C wurde aufgrund des sehr hohen energetischen Aufwandes und langer Behandlungszeiten bei diesen Untersuchungen verzichtet. 40 kg mechanisch aufbereitete Restabfälle wurden als zu behandelnde Masse eingesetzt und eine Behandlungszeit von 3,5 Stunden wurde bei allen Versuche verwendet (siehe Abschnitt 5.4.2).

Der Trockensubstanzgehalt der untersuchten mechanisch aufbereiteten Restabfälle variierte zwischen 44,7 und 62,8 Gew.-%. Obwohl Abfälle heterogene Stoffgemische sind, traten Schwankungen nur zwischen den verschiedenen Chargen auf. Die Charge mit dem höchsten TS-Gehalt wies einen erhöhten Anteil an Sperrmüll auf.

Aufgrund des schon erwähnten Defekts am Stromzähler der Kältemaschine wurde die Versuchsreihe zweimal durchgeführt. Dennoch ist die erste Versuchsdurchführung bezogen auf die Trocknungsqualität des Substrates sowie das Kondensat ausgewertet worden.

## Ergebnisse

Abbildung 6.24 zeigt für alle Versuche (erste und zweite Versuchsdurchführung) den Eingangs- und Endtrockensubstanzgehalt der Abfälle. Auffallend sind die Versuche bei 50 mbar und 105°C, mit denen der höchste TS-Gehalt erreicht wurde.

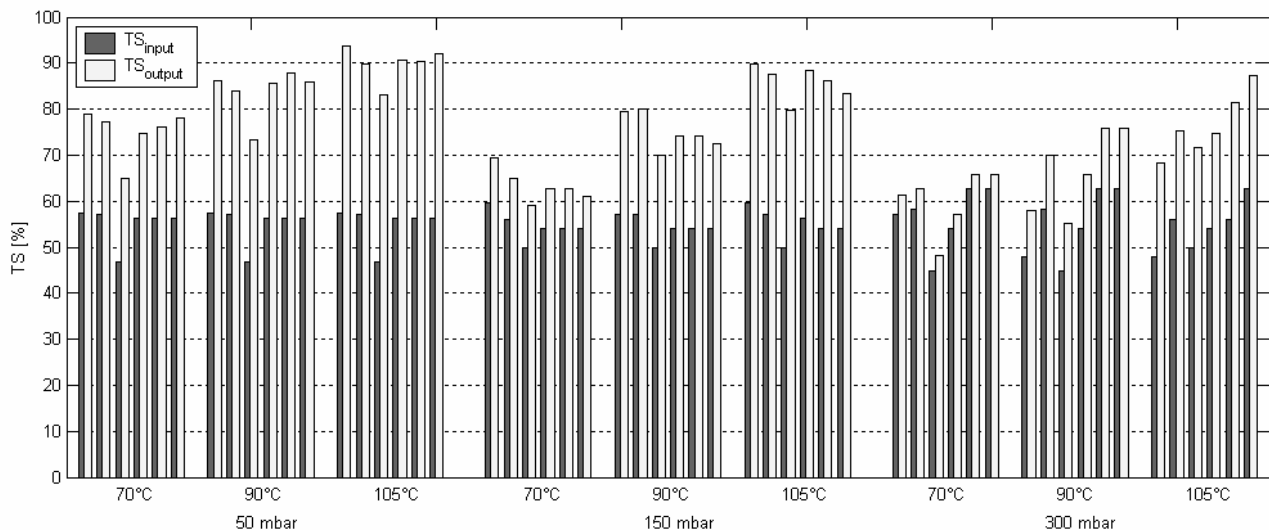


Abbildung 6.24: Trockensubstanzgehalt des Substrates nach 3,5 Stunden Trocknungszeit (erste und zweite Versuchsdurchführung)

In den Abbildungen und Tabellen zur energetischen Betrachtung sind nur Daten aus der zweiten Versuchsdurchführung dargestellt. Abbildung 6.25 zeigt für die zweite Versuchsdurchführung den spezifischen Energieaufwand (kWh/kg verdampftes Wasser) sowie den Eingangs- und Endtrockensubstanzgehalt der Anlage. Die Versuche bei 50 mbar wiesen sowohl den höchsten TS-Gehalt als auch den niedrigsten spezifischen Energieaufwand auf.

Um die Beeinflussung der Temperatur und des Druckes besser beurteilen zu können, wurden in Abbildung 6.26 nur die Versuche mit ungefähr gleichen Eingangstrockensubstanzgehalten aufgetragen. Der TS-Output von Versuchsdurchführungen mit gleichem TS-Input wurde gemittelt. In Tabelle 6.4 sind der Gesamtenergieaufwand und der spezifische Energieaufwand der Versuche aus Abbildung 6.26 zusammengefasst.

Die Versuche bei 50 mbar und 105°C erreichten die höchsten TS-Gehalte und ihr spezifischer Energieaufwand (2,47kWh/kg verdampftes Wasser) lag höher als bei den Versuchen mit 90°C (2,30 kWh/kg verdampftes Wasser).

Hinsichtlich der Outputqualität (TS) der behandelten Substrate und unter Berücksichtigung der Schwankungen im Eingangstrockensubstanzgehalt sind die Varianten 50

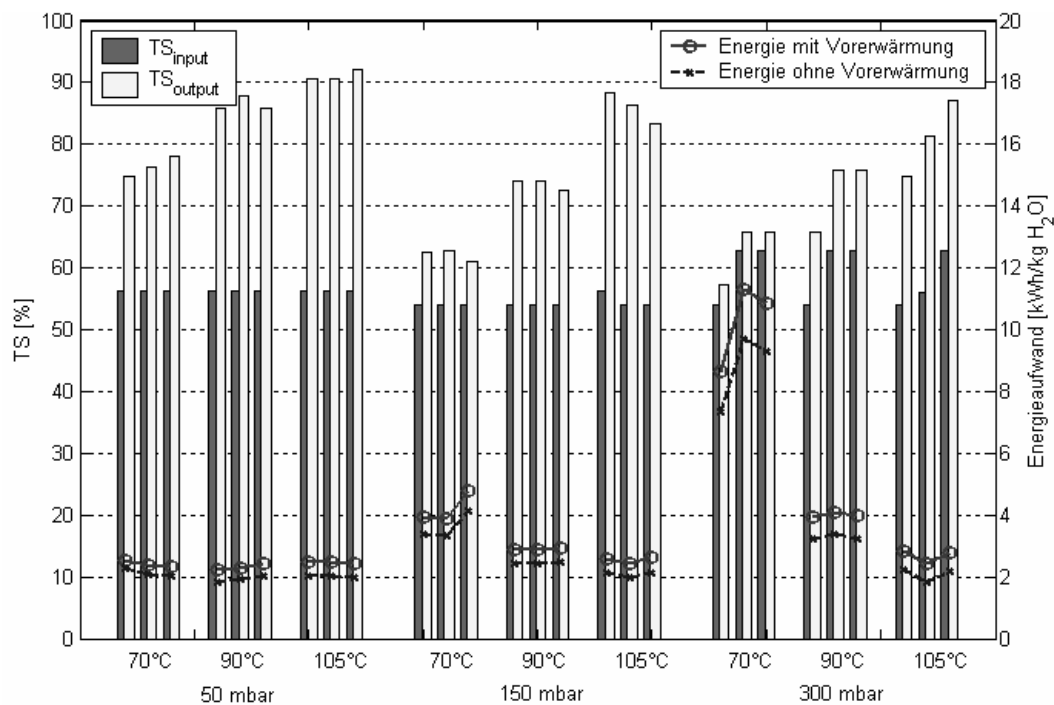


Abbildung 6.25: Trockensubstanzgehalt des Substrates und Energieaufwand nach 3,5 Stunden Trocknungszeit (zweite Versuchsdurchführung)

mbar, 70°C; 150 mbar, 90°C und 300 mbar, 105°C gleichwertig. Die Varianten 50 mbar, 90°C und 150 mbar, 105°C erzielen ebenfalls gleichwertige TS-Gehalte.

Diese Ergebnisse zeigen den positiven Einfluss von niedrigem Druck und hohen Temperaturen auf die Trocknungsergebnisse. Der zeitliche Verlauf der Kondensatmenge, in Abbildung 6.27 dargestellt, verdeutlicht ebenfalls diesen Zusammenhang. Wird der spezifische Energieaufwand berücksichtigt, zeigt der Versuch bei 50 mbar und 90°C die besten Ergebnisse. Der Energieverbrauch der Vakuumpumpe ist unabhängig von dem Behandlungsdruck, da sie im Dauerbetrieb läuft. Daher sind die Heizmanteltemperatur und die Siedetemperatur die entscheidenden Parameter für die Trocknungseffizienz. Mit Zunahme des Behandlungsdruckes nimmt der Bedarf an Wärmeenergie zur Verdampfung zu.

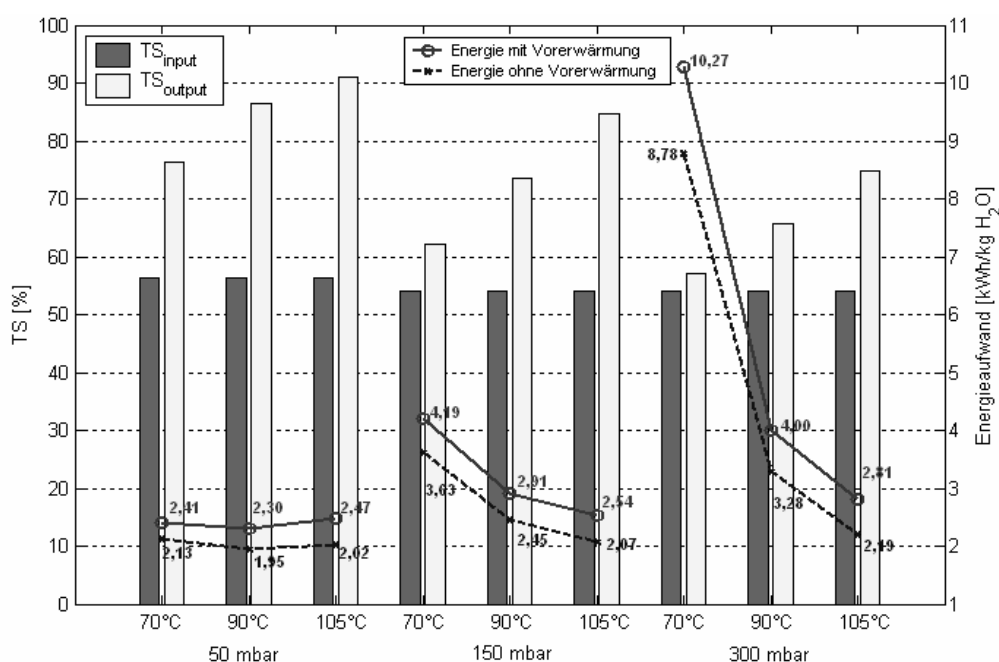


Abbildung 6.26: Mittelwerte des Trockensubstanzgehaltes und spezifischen Energieaufwandes (zweite Versuchsdurchführung)

Tabelle 6.4: Energieaufwand der Anlage mit und ohne Vorerwärmungsenergie - Mittelwerte

	Behandlungs- temperatur	mit Vorerwärmungsenergie		ohne Vorerwärmungsenergie	
		Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/kg H <sub>2</sub> O]
50 mbar	70°C	25,40	2,41	22,44	2,13
	90°C	32,14	2,30	27,18	1,95
	105°C	37,70	2,47	30,88	2,02
150 mbar	70°C	21,88	4,19	18,92	3,63
	90°C	31,08	2,91	26,12	2,45
	105°C	36,97	2,54	30,14	2,07
300 mbar	70°C	20,32	10,27	17,36	8,78
	90°C	27,77	4,00	22,80	3,28
	105°C	30,67	2,81	23,84	2,19

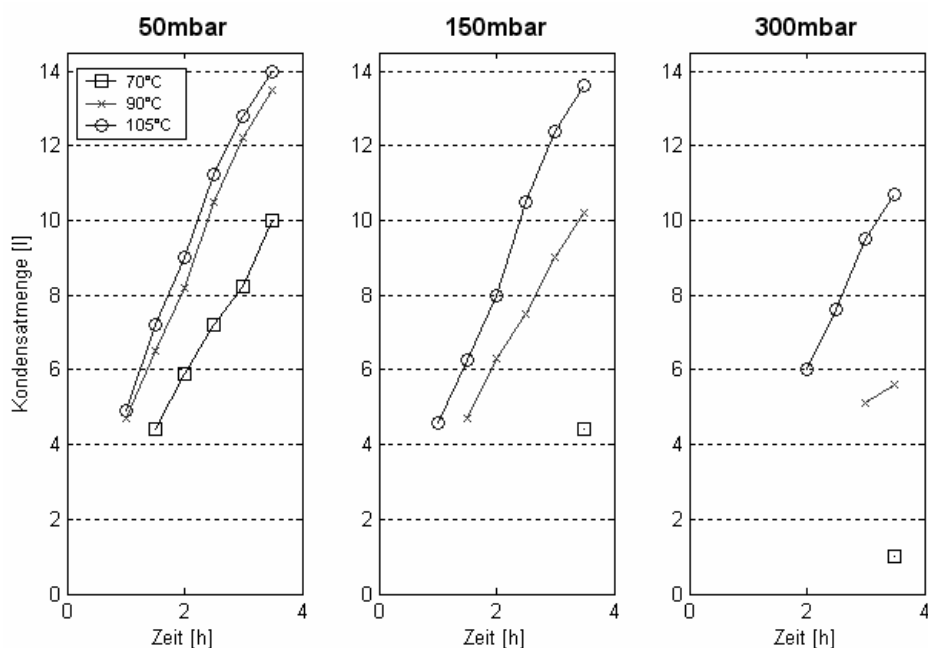


Abbildung 6.27: Zeitlicher Verlauf des Kondensatanfalls

Die Qualität des Kondensates wurde hinsichtlich des Anhangs 51 der Abwasserverordnung für Oberirdische Ablagerung von Abfällen bewertet (Tabelle 6.5) [56]. Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) und die Ammonium-Konzentration sind jeweils in Abbildung 6.28 und Abbildung 6.29 dargestellt.

Tabelle 6.5: Grenzwerte nach Abwasserverordnung Anhang 51

Parameter	Grenzwert [mg/l]
CSB	200
BSB <sub>5</sub>	20
Stickstoff gesamt	70

Das Kondensat weist erhebliche Belastungen auf, wobei in den meisten Fällen die Versuche unter niedrigerem Druck (50 mbar), vermutlich aufgrund der höheren Verdünnung (höhere Verdampfungsrate), niedrigere CSB-Konzentration als bei anderen Druckstufen aufweisen. Anstatt der Gesamtstickstoff-Konzentration wurde aufgrund der einfacheren Durchführbarkeit in den eigenen Laboratorien die Ammonium-Konzentration bestimmt. Die erste Versuchsdurchführung ergab ein mit Ammonium höher belastetes Kondensat als die zweite Versuchsdurchführung. Dieser Wert lag aber bei nur wenigen Versuchen oberhalb des Grenzwertes für Gesamtstickstoff.

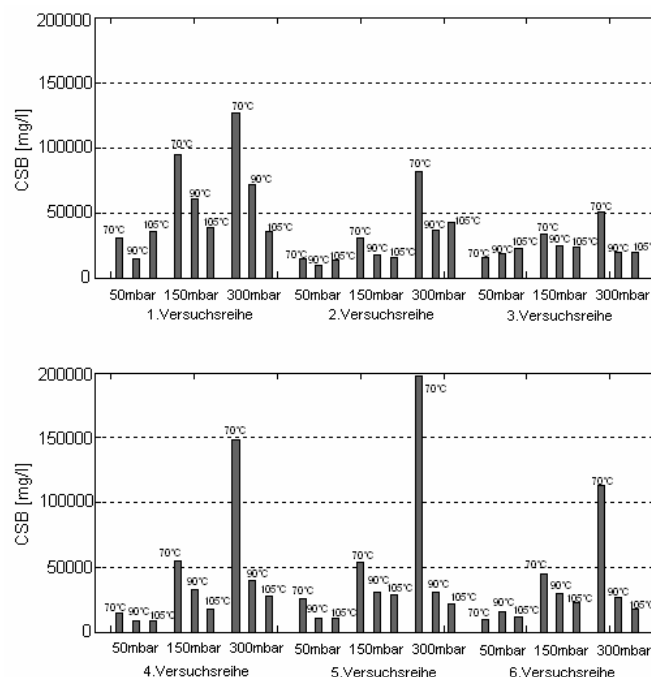


Abbildung 6.28: CSB-Konzentrationen im Kondensat (erste und zweite Versuchsdurchführung)

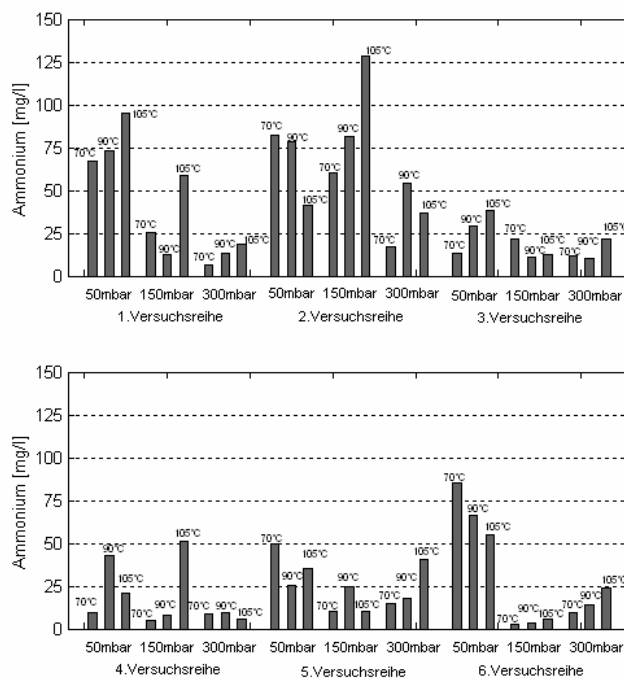


Abbildung 6.29: Ammonium-Konzentrationen im Kondensat (erste und zweite Versuchsdurchführung)

Die BSB<sub>5</sub>-Konzentration im Kondensat wurde aufgrund des hohen Kosten- und Zeitaufwandes nur für eine Substratcharge untersucht. Anhand des Verhältnisses BSB<sub>5</sub> zu CSB kann die biologische Abbaubarkeit der Probe beurteilt werden. Eine Substanz ist biologisch leicht abbaubar, wenn das Verhältnis BSB<sub>5</sub>/CSB größer oder gleich 0,5 ist. Die organischen Anteile im Kondensat der Vakuumtrocknungsanlage sind bei allen Versuchen mit Ausnahme des Versuchs bei 300 mbar und 70°C der zweiten Versuchsdurchführung sehr gut abbaubar, wie Abbildung 6.30 zeigt.

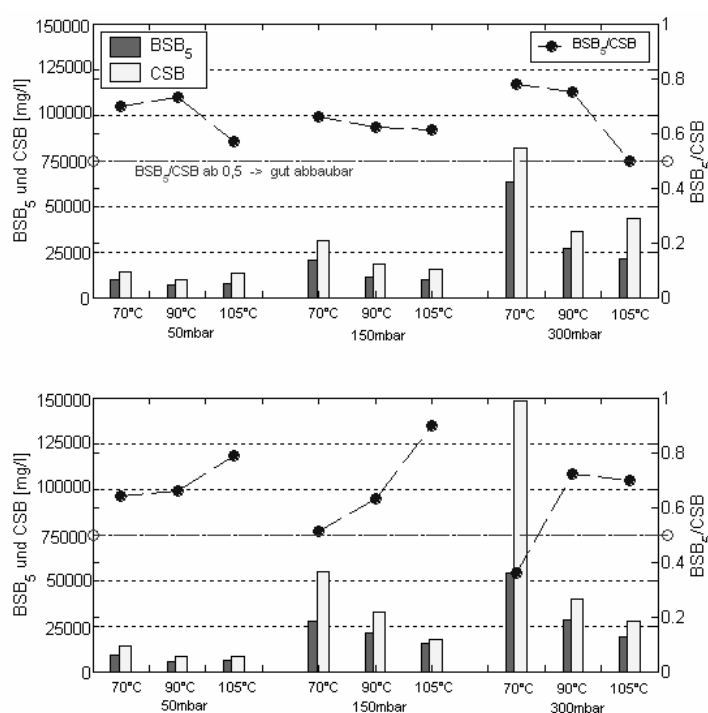


Abbildung 6.30: Verhältnis von BSB<sub>5</sub> zu CSB (erste und zweite Versuchsdurchführung)

Die elektrische Leitfähigkeit und die pH-Werte im Kondensat sind in Abbildung 6.31 dargestellt. Es ergaben sich bei allen Versuchen große Variationen in der Leitfähigkeit, wobei keine eindeutige Tendenz zu erkennen ist. Die pH-Werte lagen bei allen Versuchen im sauren Bereich. Da die Versuche unter Vakuum in Abwesenheit von Sauerstoff betrieben wurden, ist zu vermuten, dass verflüchtigte Gärungsprodukte (z.B. Alkohol) sowie organische Säuren im Kondensat enthalten sind.

Das Material des Kondensators wurde durch das saure Medium des Kondensates angegriffen, sodass Rost im Kondensat zu finden ist. Das Kondensat ist klar, wobei sich Rost absetzt und Staub flotiert.

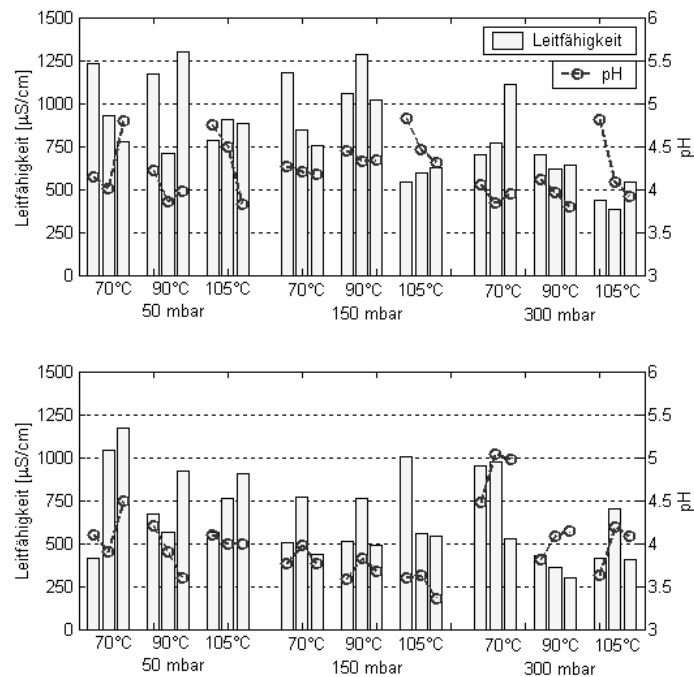


Abbildung 6.31: Elektrische Leitfähigkeit und pH-Werte (erste und zweite Versuchsdurchführung)

Die Abluft wurde gemäß TA Luft vom 24.7.2002 untersucht. Tabelle 6.6 stellt die Grenzwerte für Anlagen zum Trocknen von Abfällen dar. Die TOC-Konzentrationen sowie die Gesamtstaubmengen aller Versuchsvarianten sind in Abbildung 6.32 aufgetragen. Die TOC-Konzentrationen lagen über dem Grenzwert der TA Luft von  $20 \text{ mg/m}^3$ .

Tabelle 6.6: Grenzwerte der TA Luft – 5.4.8.11 für Anlagen zum Trocknen von Abfällen

Parameter	Grenzwert
Gesamtstaub	$< 10 \text{ mg/m}^3$
Ammoniak	$< 20 \text{ mg/m}^3$
Salzsäure	$< 20 \text{ mg/m}^3$
Organische Stoffe (TOC)	$< 20 \text{ mg/m}^3$
Geruchsintensive Stoffe	$< 500 \text{ GE/m}^3$

Die emittierte Staubmenge bei 50 mbar und 300 mbar war geringer als der in der TA Luft angegebene Grenzwert von  $10 \text{ mg/m}^3$ . Bei 150 mbar und Behandlungstemperaturen von  $90^\circ\text{C}$  und  $105^\circ\text{C}$  lagen die Staubmengen bei  $181,39 \text{ mg/m}^3$  bzw.  $99,13$



mg/m<sup>3</sup> und damit deutlich über dem Grenzwert. Bei allen anderen Fällen lag die Staubmenge unter dem Grenzwert der TA Luft.

Da die Versuche bei 50 mbar und 90°C ähnliche TS-Gehalte des Outputs zeigen wie die Versuche bei 150 mbar und 105°C (siehe Abbildung 6.26), wurde erwartet, dass diese Versuche ähnliche Staubmengen emittieren. Weiterhin wurde vermutet, dass die Abluft bei hoher Temperatur höher mit Staub belastet ist. Dies konnte durch die Messungen nicht bestätigt werden. Als Ursache für die Ergebnisse wird eine verstärkte Kondensation durch die erhöhte Wasserdampfmenge (Volumen) bei niedrigerem Druck und hoher Temperatur vermutet. Bei einer entsprechenden Siedetemperatur nimmt 1 kg Wasser bei 50 mbar (32,9°C) ein Volumen von ca. 28 m<sup>3</sup> ein, im Vergleich zu 10,01 m<sup>3</sup> bei 150 mbar (54°C) und 5,04 m<sup>3</sup> bei 300 mbar (69,1°C). Es konnte beobachtet werden, dass dieses erhöhte Volumen an Wasserdampf zu verstärkter Kondensation im Abluftrohr führte, wo dann Staub zurückgehalten wurde.

Die Abluft ist frei von Salzsäure und Ammoniak, da in derart saurem Milieu das Gleichgewicht zwischen NH<sub>3</sub> und NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Abbildung 6.33) weit auf der Seite des Ammoniums liegt. Da die Anlage eine Pilotanlage mit niedrigem Abluftvolumen ist, wurde auf die Analyse von geruchsintensiven Stoffen verzichtet.

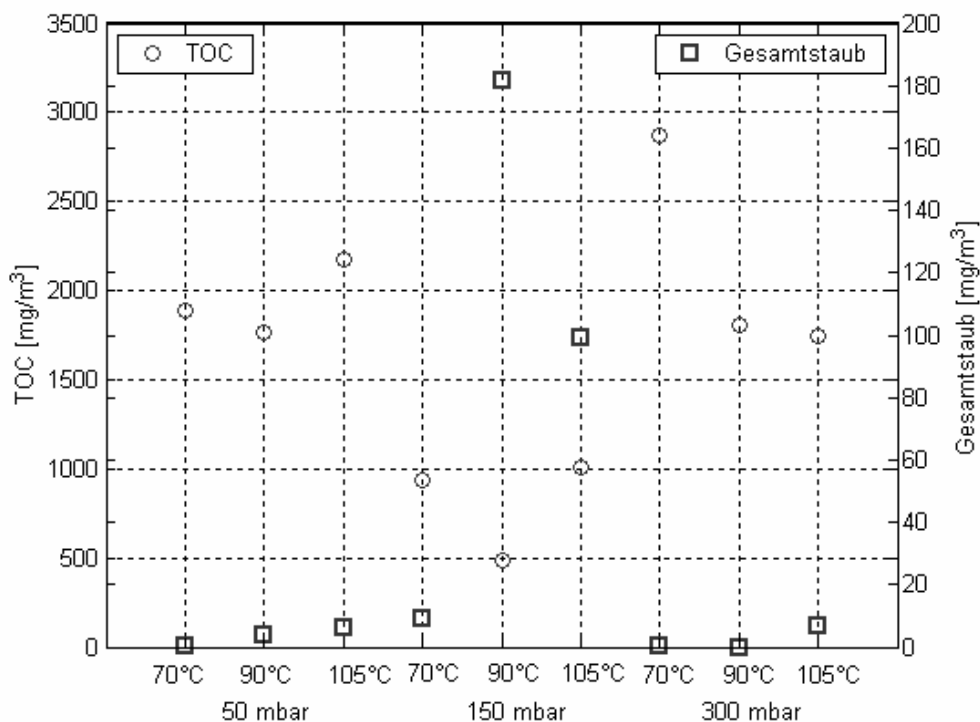


Abbildung 6.32: TOC-Konzentration und Gesamtstaubmenge in der Abluft

Tabelle 6.7: Gesamtstaubmenge in der Abluft

		Gesamtstaubmenge [mg/Nm <sup>3</sup> ]
<b>50 mbar</b>	70° C	0,56
	90° C	3,51
	105° C	6,32
<b>150 mbar</b>	70° C	8,83
	90° C	181,39
	105° C	99,13
<b>300 mbar</b>	70° C	0,39
	90° C	0,00
	105° C	6,93

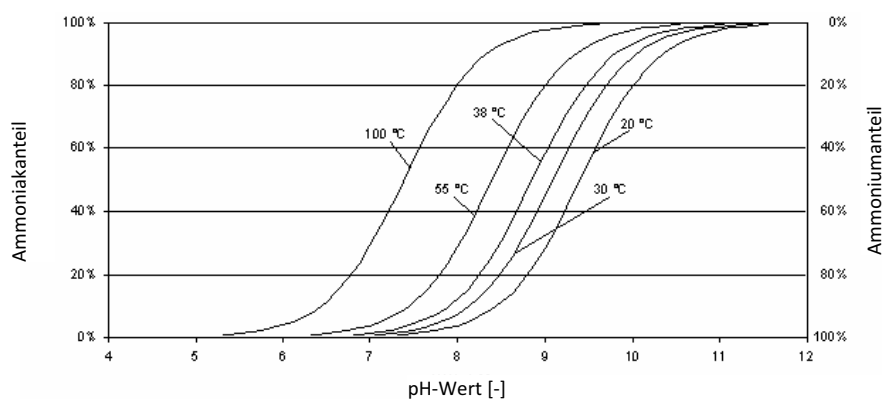


Abbildung 6.33: Dissoziantionsgleichgewicht von Ammoniak/Ammonium in Abhängigkeit von pH-Wert und Temperatur [33]

Die Massenbilanzen sind in Abbildung 6.34 aufgetragen. Es sind die prozentualen Anteile des getrockneten Substrates, Kondensates sowie Wassers, das über die Abluft aus dem System abgeführt wird, dargestellt. Die Abluft wurde durch die Fehlmasse des Prozesses bestimmt, da aufgrund der Bauart der Vakuumpumpe, die beständig die Abluft mit Umgebungsluft vermischt, keine Erfassung des Abluftvolumens möglich ist. Wie schon erwartet, erreichte der Versuch bei 50 mbar und 105°C den höchsten Anteil an verdampftem Wasser (38%, Kondensat plus Abluft). In Tabelle 6.8 sind die Abluftfrachten ( $\text{m}^3$  Abluft / kg FS) aufgetragen. Die Behandlungen bei einer Temperatur von 105°C bei 50 mbar und 300 mbar stellen die höchsten Abluftfrachten dar.

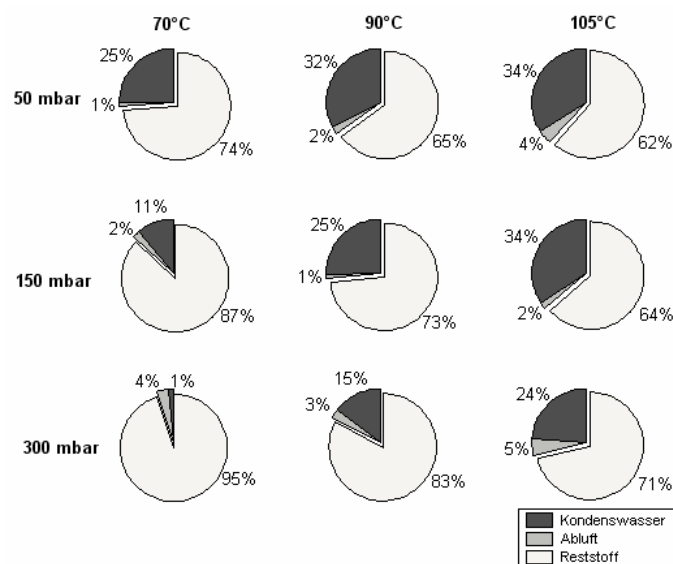


Abbildung 6.34: Massenbilanzen der Trocknungsversuche (Mittelwert)

Die prozentuale Verteilung des energetischen Aufwandes der einzelnen Anlagenteile ist in Abbildung 6.35 (mit Vorerwärmungsenergie der Anlage) und Abbildung 6.36 (ohne Vorerwärmungsenergie der Anlage) dargestellt. Die Heizung verbraucht den größten Teil des gesamten Energieaufwandes. Der zweitgrößte energetische Anteil entfällt auf das Kühlsystem, das zwischen 18% und 28% des gesamten Energieanteils ohne die Vorerwärmungsenergie der Anlage benötigt. Die Erzeugung des Vakuums verbraucht in diesem Fall zwischen 10% und 18% des gesamten Energieaufwandes.

Tabelle 6.8: Abluftfrachten ( $\text{m}^3$  Abluft/kg FS)

		Abluft [ $\text{m}^3$ /kg FS]
50 mbar	70°C	0,02
	90°C	0,04
	105°C	0,07
150 mbar	70°C	0,04
	90°C	0,02
	105°C	0,04
300 mbar	70°C	0,06
	90°C	0,05
	105°C	0,08

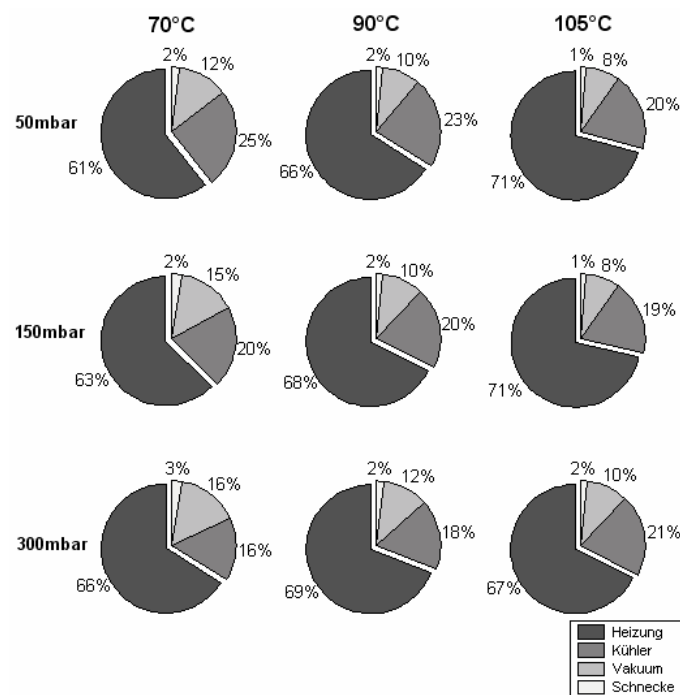


Abbildung 6.35: Energiebilanz – Anteil der einzelnen Anlagenteile am Gesamtenergieaufwand bei kontinuierlich laufender Vakuumpumpe (mit Energie zur Vorerwärmung der Anlage)

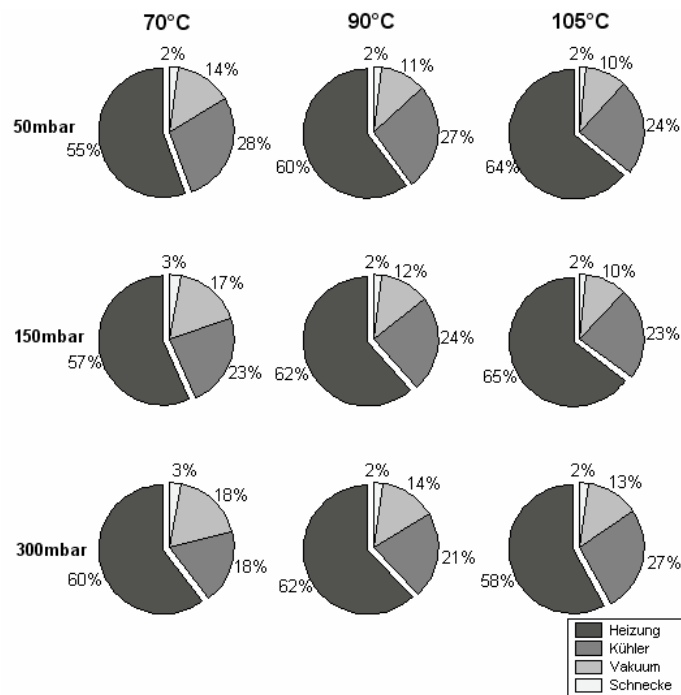


Abbildung 6.36: Energiebilanz – Anteile der einzelnen Anlagenteile am Gesamtenergieaufwand bei kontinuierlich laufender Vakuumpumpe (ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage)

Bezüglich der eingesetzten Energie kann eine Vakuumtrocknungsanlage in vier wesentliche Teile untergliedert werden:

*1. System – Reaktor:*

Hier werden elektrische Energie und Wärmeenergie zugeführt. Elektrische Energie wird zum Antrieb der Schnecke (Umwälzung des Substrates) verwendet. Die Wärmezufuhr erfolgt über eine an der Außenwand des Reaktors angelegte Thermoölmantelheizung. Diese Wärmeenergie wird zur Erwärmung des Reaktors, Erwärmung des Substrates und Wasserverdampfung benötigt. Verluste von Wärmeenergie durch Strahlung und freie Konvektion sind zu berücksichtigen.

*2. System – Heizung und 3. System – Vakuumpumpe:*

Hier wird nur elektrische Energie zugeführt.

*4. System – Kondensator und Kältemaschine:*

Der Kondensator verflüssigt die Brüden des Reaktors. Die Kühlung erfolgt durch eine elektrisch angetriebene Kältemaschine.

Die Wärmeenergiebilanz der Anlage ist in Abbildung 6.37 dargestellt. Die insgesamt benötigte Energiemenge, um das Substrat zu erwärmen, die Verdampfungsenergie des Wassers sowie die Verluste an die Umgebung durch Strahlung und freie Konvektion wurden berechnet und hier aufgetragen. Die Differenzen der Energiebilanz, die in der Abbildung zu finden sind, resultieren aus Ungenauigkeiten in der jeweiligen Messung sowie Energieverluste bedingt durch den Wirkungsgrad der Heizung und Abstrahlungsverluste der Leitungen, die hier nicht berechnet worden sind. Die Energie zur Verdampfung des Wassers wurde über die Verdampfungsenthalpie des jeweils anliegenden absoluten Druckes berechnet. Da sich die Verdampfungsenthalpie auf freies Wasser bezieht und das Wasser im untersuchten Abfall zu großen Teilen in gebundener Form vorliegt, sind die angegebenen Werte zu niedrig.

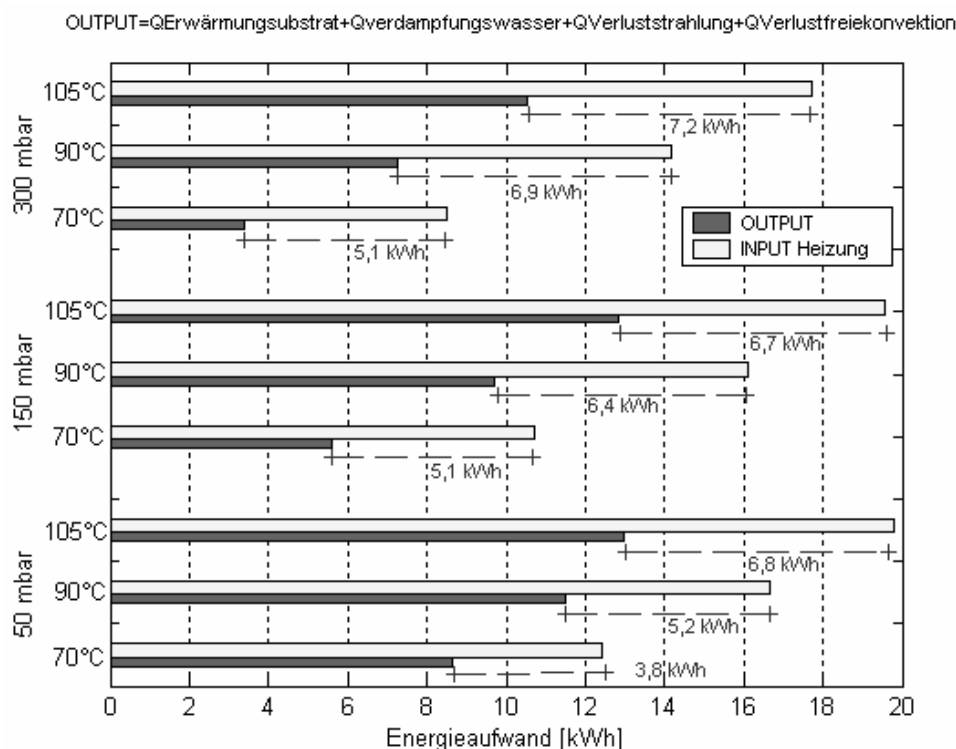


Abbildung 6.37: Wärmeenergiebilanz der Anlage ohne Vorerwärmung

Konvektion und Strahlung wurden über Messungen und anschließende Berechnung ermittelt. Die Berechnungsgrundlage dafür wurde im Kapitel 3 erläutert.

Die spezifische Wärme von Restabfall, die benötigt wird, um die Erwärmungsenergie des Substrates zu berechnen, wurde graphisch (Abbildung 3.4) in Abhängigkeit zum Wassergehalt des Substrates ermittelt.

In Anhang I sind die Energiebilanzen der einzelnen Versuche mit detaillierter Auf-  
führung der Einzelanteile sowie der zeitliche Verlauf des Druckes und der Sättigungs-

dampfdruck aufgetragen.

Der Sättigungsdampfdruck (maximaler Dampfdruck bei einer bestimmten Temperatur) im Reaktor für alle Versuchsvarianten kann nach Kenntnis der Temperatur im Reaktorraum berechnet werden. Der Versuch bei 50 mbar und 105°C zeigt eine deutliche Überhitzung des Dampfes (siehe Anhang I), da der Sättigungsdruck über dem Absolutdruck des Reaktors liegt. Diese Überhitzung bedeutet dass dem Reaktor mit der Behandlungstemperatur von 105°C mehr Wärme bereitgestellt als benötigt wird, sodass Energie ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Der Sättigungsdruck und der Absolutdruck des Versuches bei 50 mbar und 90°C liefen fast synchron. Es gab nur am Ende des Versuches eine kurze Phase, in der es zur Überhitzung des Dampfes kam. Im Versuch 50 mbar, 70°C kam es während der gesamten Versuchsdauer zu keiner Überhitzung des Dampfes.

Bei allen anderen Versuchen (150 mbar und 300 mbar) lag der Sättigungsdruck immer weit unter dem Absolutdruck (siehe Anhang I). Die Differenz zwischen dem Absolutdruck und dem Sättigungsdruck entspricht genau dem Luftdruck im Reaktor:

$$p_{abs} = p_{Dampf} + p_{Luft} \quad (6.1)$$

Die Anwesenheit von Luft beeinträchtigt den Verdampfungsprozess im Vakuum, da sich der Diffusionswiderstand an der Produktoberfläche erhöht. Der Versuch bei 50 mbar stellt wegen des relativ geringen Anteils von Luft im Reaktor eine günstige Bedingung für den Trocknungsprozess dar.

## 6.3 Großtechnische Versuchsanlage

Die Anlage wurde im Batchverfahren betrieben. Folgenden Substrate wurden untersucht:

- entwässerter Perkulationsrückstand (Restabfälle),
- unbehandelte Restabfälle,
- Restabfälle nach der Vakuumextraktion.

Die Versuchsplanung wurde in Abschnitt 5.4.3 erläutert. Die Substrate wurden vor der Befüllung ca. 12 bis 24 Stunden aerob vorerwärmt, um den Trocknungsprozess zu beschleunigen. Alle Substrate wurden auf  $< 60$  mm abgesiebt.

Der erste Trocknungsversuch wurde mit perkolierem und abgepresstem Restabfall der Perkulationsanlage der ISKA GmbH auf dem Entsorgungszentrum Sansenhecken in Buchen durchgeführt. Das Substrat wies eine Anfangstemperatur von  $61^{\circ}\text{C}$  auf, die durch die aerobe Vorerwärmung bewirkt wurde. Nach Erreichen des absoluten Druckes von 50 mbar wurde das Material drei Stunden unter Vakuum getrocknet.

Die verwendeten frischen Restabfälle wiesen zum Zeitpunkt der Befüllung eine Temperatur von ca.  $25^{\circ}\text{C}$  auf. Die letzten Versuche wurden mit Output-Material des Vakuum-Siede-Extraktionsversuches durchgeführt. Zum Zeitpunkt der Befüllung betrugen die Substrattemperaturen jeweils  $40^{\circ}\text{C}$  bzw.  $45^{\circ}\text{C}$ .

Die Befüllung des Schneckenförderers des Reaktors sowie die Aussortierung von verbliebenen Störstoffen (sperrige Metallgegenstände, Schuhe usw.) wurden händisch durchgeführt. Wie schon erwähnt wurden aufgrund der höheren Menge an Substrat und der damit verbundenen Zeit und Kosten, die Versuche nur einmal pro untersuchtem Substrat realisiert.



### 6.3.1 Ergebnisse

Die durchgeführten Versuche bestätigen die Anwendbarkeit der Vakuum-Siedetrocknungstechnologie im Hinblick auf eine Steigerung der Qualität des getrockneten Substrates. Es konnten sowohl nasse Abfälle (TS 48,8 Gew.-%) als auch relativ trockene Abfälle (TS 69,3 Gew.-%) auf hohe TS-Gehalte (TS 86,3 bzw. 89,5 Gew.-%) getrocknet werden (Abbildung 6.38). Die Behandlungszeit für den Trocknungsprozess variierte, je nach Substratumfang (Tabelle 6.9).

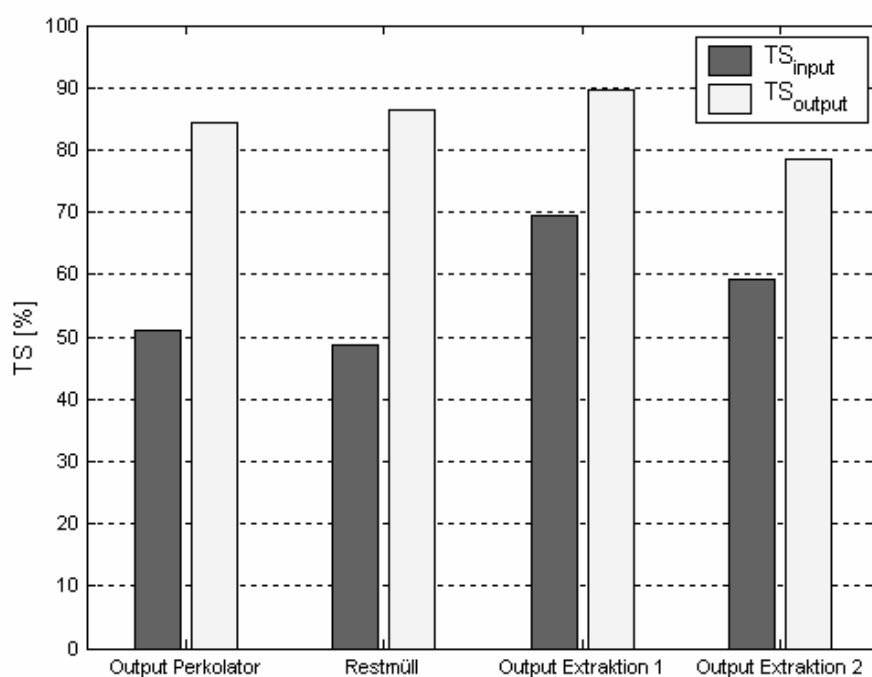


Abbildung 6.38: Trockensubstanzgehalt verschiedener Substrate

Tabelle 6.9: Stoffspezifische Kenndaten des Versuchsmaterials und Angaben zur Versuchsdurchführung

Materialvarianten	Restmüll, Entwässerter Perkolationsrückstand	Restmüll	Restmüll nach VSE 1	Restmüll nach VSE 2
Behandlungszeit	3h	4h25min	2h	2h30min
Masse	676 kg	664 kg	296 kg	495 kg
TS <sub>Input</sub> [%]	50,9	48,8	69,3	59,1
TS <sub>Output</sub> [%]	84,3	86,3	89,5	78,5

Der Abfall im Reaktor wurde kontinuierlich mittels eines Schneckenförderers durchmischt, sodass das Substrat eine gute Homogenität nach der Trocknung aufwies. In aeroben Trocknungsverfahren treten dagegen häufig große Inhomogenitäten im Trockengut auf, die insbesondere zu Problemen bei der Pelletierung und Zwischenlagerung führen. Des Weiteren verursacht diese kontinuierliche Durchmischung eine Zerkleinerung der gesamten Abfallkomponenten. Vorgänge der Nachkonfektionierung, wie Siebung, Windsichtung und Schwerstoffscheidung, Fe- und Ne-Scheidung, werden dadurch begünstigt.

Die Kondensatqualitäten des ersten Kondensators sind in Abbildung 6.39 aufgetragen. Erwartungsgemäß ist die CSB-Belastung bei frischen Restabfällen (3700 mg/l) höher als bei durch Perkolation (1837 mg/l) oder Extraktion behandelten Abfällen (2890 und 3100 mg/l). CSB-Werte der Kondensate aus dem Vorlagebehälter nach der Vakuumpumpe wurden hier nicht ermittelt, da sie mit sauberem Prozesswasser vermischt sind. Das Abluftvolumen lag unterhalb 1 m<sup>3</sup>/Mg FS Anlagen-Input.

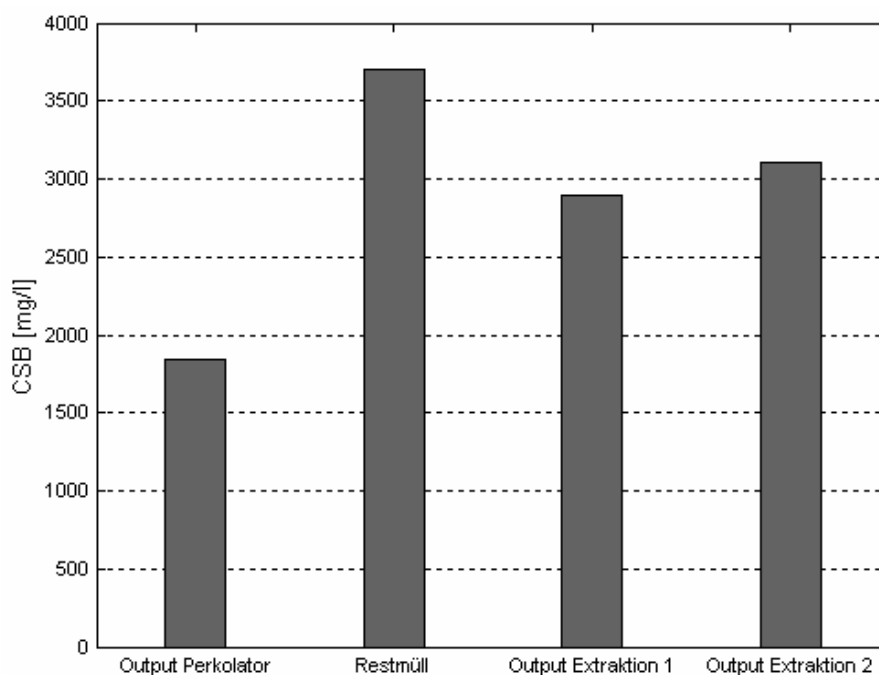


Abbildung 6.39: CSB-Konzentrationen des Kondensatabzugs

Die Zeit zur Befüllung sowie zur Entleerung der Anlage hat einen wesentlichen Anteil der Versuchsdauer ausgemacht (ca. 4-5 Stunden insgesamt). Auch einzelne Anlagenteile können nur händisch bedient werden (Entleerungsschieber, Anlegen der Förderschnecke zur Befüllung usw.). Das verursacht Verzögerungen im logistischen Ablauf des Prozesses, die zu einem zeitlichen und energetischen Mehraufwand führen. Deswegen wurde in Tabelle 6.10 der spezifische Energieaufwand der Anlage nur bei Laufzeit der Vakuumpumpe und ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage aufgeführt.

Tabelle 6.10: Spezifischer Energieaufwand der großtechnischen Versuchsanlage ohne Vorerwärmungsenergie

	Output Perkolator	Restabfälle	Output VSE 1	Output VSE 2
<b>Wärme</b> [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	0,78	0,56	0,62	0,82
<b>Strom</b> [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	0,72	0,58	0,85	0,89
<b>Summe Energie</b> [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	1,50	1,14	1,47	1,71

Die elektrische Energie der großtechnischen Versuchsanlage benötigt in den meisten Fällen den größten Anteil am gesamten Energieaufwand. Der elektrische Energieaufwand der einzelnen Anlageteile wurde bei der Anlage nicht getrennt erfasst.



# Kapitel 7

## Auswertung und Diskussion

Im Folgenden werden die Versuche der einzelnen Anlagen (Labor-, halbtechnische und großtechnische Versuchsanlage) hinsichtlich der beschriebenen Bewertungskriterien aus Kapitel 4 getrennt ausgewertet. Die wesentlichen Punkte der Versuche werden hier kurz zusammengefasst. Anschließend wird ein Vergleich der Vakuum-Siedetrocknungsanlagen zu einem biologischen Trocknungsverfahren aufgeführt.

### 7.1 Laboranlage

Bei den Versuchen mit Maissilage in der Laboranlage stellt die Versuchsvariante mit der höchsten Behandlungstemperatur (105°C) die günstigste Variante hinsichtlich des erreichten Trockensubstanzgehaltes dar. Maissilage mit einem TS-Gehalt von 32% erreichte mit einem spezifischen Energieaufwand (ohne Vorerwärmungsenergie) von 6,15 Wh/g verdampftes Wasser einen TS-Gehalt von 87,3 Gew.-%.

Die Untersuchung einer Variation des Druckes [25] in dem Vakuumschrank wies einen höheren Trockensubstanzgehalt bei niedrigerem absoluten Druck nach.

Die gemessenen CSB- und TOC-Werte im Abscheider und in der Kondensatfalle zeigen hohe Belastungen. Die CSB- und TOC-Werte im Abscheider liegen im Bereich von ca. 16000 - 23000 mg/l bzw. 8000 - 10500 mg/l, während in der Kondensatfalle Werte von 10000 - 11516 mg/l bzw. 6075 - 6800 mg/l gemessen wurden. Es konnte keine eindeutige Korrelation zwischen der Temperatur und der Kondensatqualität

festgestellt werden. Auf Untersuchungen der Abluftqualität wurde in dieser Anlage verzichtet.

Versuche mit Restabfällen wurden ebenfalls in der Laboranlage durchgeführt. Sie werden hier nicht betrachtet, da bei der Versuchsanlage nur eine sehr kleine Menge an Substrat untersucht werden kann und damit Versuche mit sehr heterogenen Substraten nicht repräsentativ sind.

Bei der Laboranlage war eine Durchmischung des Substrates nicht möglich, sodass Probleme wie Rückkondensation (siehe Kapitel 3) im Substrat längere Trocknungszeiten verursacht haben.

Der positive Einfluss des höheren Temperaturgradienten zwischen der Vakuumschranktemperatur und der Siedetemperatur auf den Trocknungsvorgang wurde bestätigt (siehe Abschnitt 3.6). Behandlungen mit höheren Temperaturen erreichen eine bessere Trocknungsrate. Die Trocknungsgeschwindigkeit wurde erwartungsgemäß durch einen höheren Temperaturgradienten beschleunigt. Die Ergebnisse aus der Laboranlage dienten zur Hilfe bei der Erstellung des Versuchskonzeptes für die halbtechnische Versuchsanlage.

## 7.2 Halbtechnische Versuchsanlage

Die Versuche mit Maissilage und mechanisch aufbereiteten Restabfällen werden zunächst einzeln zusammengefasst und ausgewertet. In Abschnitt 7.2.3 werden die Ergebnisse der beiden untersuchten Substrate dann miteinander verglichen. Anschließend erfolgen eine energetische Beurteilung und Optimierungsmaßnahmen der Anlage. Zur statistischen Untersuchung der Ergebnisse wird in Abschnitt 7.2.6 ein Regressionsmodell der Versuche mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen präsentiert.

### 7.2.1 Auswertung der Versuche mit Maissilage

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuche mit Maissilage in Hinsicht auf Energieeffizienz, Trocknungsqualität und Emissionen bewertet.

Tabelle 7.1 fasst die wesentlichen Ergebnisse der beiden Versuchsphasen zusammen. Bei Phase 1 wurden nur die Versuche bei 105°C dargestellt, da bei den anderen Behandlungstemperaturen sehr schlechte Trocknungsqualitäten erreicht wurden.

Die Trocknung bei einer Behandlungstemperatur von 105°C ist energetisch am günstigsten im Vergleich zu den anderen Versuchen bei 70°C (Tabelle 7.1). Hier konnte auch ein höherer TS-Output erreicht werden.

Hinsichtlich der Behandlungszeit stellt sich die Trocknung mit einer Behandlungstemperatur von 70°C mit 7,5 Stunden Behandlungszeit als ungeeignet heraus. Dies wirkt sich negativ auf die erreichbare Behandlungskapazität einer potentiellen Großanlage aus. Dieses Problem könnte z.B. durch Reduzierung der Menge an Substrat im Reaktorraum oder durch Erhöhung der Kontaktfläche des Reaktors minimiert werden. Eine Erhöhung würde jedoch die Kosten zum Bau der Anlage (z.B. Reaktor mit größeren Abmessungen) erhöhen.

Tabelle 7.1: Zusammenfassung des spezifischen Energieaufwandes und Trockensubstanzgehaltes: Versuche Phase 1 und 2

	Phase 1	Phase 2			
<b>TS<sub>Input</sub>[%]</b>	37,3	30,7		28,7	
<b>Behandlungstemperatur [°C]</b>	105	70	105	70	105
<b>Energieverbrauch Strom [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	0,67	0,88	0,66	0,89	0,66
<b>Energieverbrauch Wärme [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,12	1,12	1,18	1,14	1,21
<b>Energieverbrauch Summe [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,78	2,00	1,84	2,03	1,87
<b>Behandlungszeit [h]</b>	3,5	7,5	5	7,5	5
<b>TS<sub>Output</sub>[%]</b>	83,5	82,0	89,0	73,0	77,0

Mit der Behandlung bei 105°C konnte die gleiche Substratmenge wie bei 70°C mit 67% der notwendigen Behandlungszeit bei einem höheren Trockenoutput getrocknet werden.

Die Anfangsfeuchte des Substrates spielt eine sehr wichtige Rolle bei einem Trocknungsprozess. Abhängig von der Anfangsfeuchte kann sich eine Trocknung als unwirtschaftlich herausstellen. Hohe Wassergehalte führen zu einem hohen Energieaufwand, längeren Behandlungszeiten der Trocknung und hohen Kosten aufgrund der Dimensionierung der Anlage, da der Kondensator entsprechend der anfallenden Verdamp-

fungsrate dimensioniert sein muss. Bei den untersuchten Substraten mit TS-Gehalten zwischen 28,7 und 37,3 Gew.-% hat sich der in der Anlage verwendete Kondensator als geeignet erwiesen.

In Tabelle 7.2 ist der ermittelte Energieaufwand der Versuche mit der halbtechnischen Anlage im Vergleich zu bereits am Markt etablierten Verfahren dargestellt. Es wurden Daten aus der Trocknung von entwässertem Klärschlamm aufgrund ihrer möglichen Vergleichbarkeit und Verfügbarkeit verwendet, insbesondere bei Werten von Wärme- und Stromverbrauch, die sonst nur begrenzt verfügbar sind.

Tabelle 7.2: Energiewerte des Vakuumsiedetrockners, Trommeltrockners, Bandrockners und Wirbelschichtrockners

	Mais-silage 105°C	Mais-silage 70°C	Mais-silage 105°C	Mais-silage 70°C	Mais-silage 105°C	entw. Klär-schlamm	entw. Klär-schlamm	entw. Klär-schlamm
<b>TS<sub>Input</sub> [%]</b>	37,3	30,7	30,7	28,7	28,7	25	25	25
<b>Trocknerart</b>	VST	VST	VST	VST	VST	Trommel-trockner	Band-trockner	WST
<b>Strom [kWh/H<sub>2</sub>O]</b>	0,67	0,88	0,66	0,89	0,66	0,25	0,70	1,08
<b>Wärme [kWh/H<sub>2</sub>O]</b>	1,12	1,12	1,18	1,14	1,21	0,81	0,55	0,92
<b>Summe Energie [kWh/H<sub>2</sub>O]</b>	1,78	2,00	1,84	2,03	1,87	1,06	1,25	2,00
<b>TS<sub>Output</sub> [%]</b>	83,5	82	89	73	77	90	90	90

Die Vakuum-Siede-Trocknung erfordert im Vergleich zu dem Bandtrockner und Trommeltrockner einen höheren spezifischen Energieaufwand, während ein Wettbewerbsvorteil im Vergleich zu dem Wirbelschichttrockner festzustellen ist.

Zu berücksichtigen ist, dass es sich bei etablierten Verfahren um Anlagen handelt, die basierend auf einem Einwohnergleichwert von 70.000 (1840 Mg TS/a) bzw. 10.000 (263 Mg TS/a) dimensioniert wurden, und die relativen Energieverluste sowie der spezifische Energieaufwand bei einem Scale-up der Anlage geringer werden [1].

Ein optimiertes Wärmekonzept für eine Vakuum-Siede-Anlage, um den spezifischen



Energieaufwand zu minimieren, wäre erreicht, wenn der absolute Wärmebedarf des Reaktors möglichst niedrig liegt. Die Nutzung von Abwärme eines Blockheizkraftwerks (BHKW) kann die Kosten der Anlage wesentlich reduzieren.

Des Weiteren spielt die Kopplung von Trocknung mit der energetischen Verwertung eine sehr wichtige Rolle, da das Energiepotenzial des Substrates den energetischen Bedarf der Anlage optimieren kann.

Der Trocknungsprozess unter Vakuum vermindert das Risiko der Brand- und Explosionsgefahr aufgrund des niedrigen Sauerstoffgehaltes in dem Reaktor, während höchste Brand- und Explosionsgefahr bei z. B. Trommel- und Bandtrocknern bestehen.

Die Untersuchung des Kondensates ergab eine maximale CSB-Belastung von 29250 mg/l. Dieser Wert lag oberhalb des Grenzwertes für CSB der Abwasserverordnung Anhang 51.

Das Kondensat enthielt mehr Rostpartikel aus dem Kondensatorbehälter als Staubstoffe. Eine Beschichtung des Kondensatorbehälters mit einem korrosionsbeständigen Material ist daher empfehlenswert.

Die Analysen der Abluft hinsichtlich Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid und Methan ergaben Konzentrationen wie in der Umgebungsluft.

### **7.2.2 Auswertung der Versuche mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen**

Der Trocknungsprozess bei 50 mbar und 90°C zeigt sich aus energetischer Sicht wirtschaftlicher als die anderen Varianten. Der Vorteil der Trocknung unter erhöhtem Vakuum wurde bewiesen. Der spezifische Energieaufwand der Anlage lag bei höherem absoluten Druck (150 mbar und 300 mbar) über dem spezifischen Energieaufwand bei 50 mbar. Die Versuche bei einer Temperatur von 90°C und 50 mbar konnten nach 3,5 Stunden Behandlungszeit Trockensubstanzgehalte von über 85% erreichen. Damit konnte eine Voraussetzung für den Einsatz als Ersatzbrennstoff mit der Vakuum-Siede-Trocknungsanlage erreicht werden. Der Versuch bei 50 mbar und 90°C zeigt einen niedrigeren Energieverlust als der Versuch bei 105°C (siehe Anhang I - Energiebilanz). Die Ursache hierfür ist, dass je höher die Behandlungstemperatur ist, desto höher auch die Energieverluste durch Abstrahlung, Konvektion und Wandlung der elektrischen in thermische Energie der Heizanlage werden. Bei 105°C trat eine Überhitzung des Wasserdampfs auf, die den Energieaufwand der Anlage erhöhte.

Das Kondensat zeigt bei dieser günstigen Variante (50 mbar, 90°C) eine CSB-Konzentration in Höhe von 8050 - 10050 mg/l. Eine Analyse auf BSB<sub>5</sub> ergab eine gute Abbaubarkeit dieser Belastungen.

Die Abluft der Variante 50 mbar und 90°C enthielt ca. 2 kg Wasser in Form von Wasserdampf und war mit einer TOC-Konzentration von 1761,96 mg/m<sup>3</sup> belastet.

Um die gesamte Wasserdampfmenge zu kondensieren, ist eine Optimierung des Kondensators zu empfehlen. Die Staub-Konzentration lag bei den günstigeren Varianten unter dem Grenzwert der TA Luft für Anlagen zur Trocknung von Abfällen. Mit einer Optimierung des Kondensators und einer dadurch reduzierten Feuchtigkeit der Abluft ist zu erwarten, dass sich die Staubmenge in der Abluft erhöht.

In Tabelle 7.3 ist der Energieverbrauch der halbtechnischen Vakuumtrocknungsanlage im Vergleich zu bereits am Markt etablierten Verfahren dargestellt. Es wurden hier Daten aus der Trocknung von Grünabfall verwendet.

Tabelle 7.3: Vergleich der spezifischen Energieaufwände des halbtechnischen Vakuumtrockners, Bandtrockners und Trommeltrockners

<b>Trocknerart</b>	<b>VST 50 mbar/90°C mit Vorerwärmung</b>	<b>VST 50 mbar/90°C ohne Vorerwärmung</b>	<b>Band- trockner</b>	<b>Trommel- trockner</b>
<b>Substrat</b>	Restabfall	Restabfall	Grünabfall	Grünabfall
<b>TS<sub>Input</sub>[%]</b>	56,3	56,3	65	65
<b>TS<sub>Output</sub>[%]</b>	86,4	86,4	90	90
<b>Art der Beheizung</b>	Indirekt	Indirekt	Indirekt	Direkt
<b>Wärme [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,55	1,19	0,99	1,07
<b>Strom [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	0,75	0,76	0,24	0,68
<b>Summe Energie [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	2,30	1,95	1,23	1,75

Die halbtechnische Vakuumtrocknungsanlage benötigt im Vergleich zu dem Band- und Trommeltrockner einen höheren spezifischen Energieaufwand. Zu berücksichtigen ist, wie schon in dem Abschnitt der Maissilage erwähnt, dass sich diese schon etablierten

Verfahren auf Daten von Großanlagen beziehen, wobei die relativen Energieverluste sowie spezifischen Energieaufwände geringer werden.

Darüber hinaus ist die Vakuumanlage energetisch optimierbar. Optimierungsvorschläge werden in dem Abschnitt 7.2.5 aufgeführt.

### **7.2.3 Vakuum-Siede-Trocknung von Silage und Restabfall im Vergleich**

Maissilage und mechanisch aufbereitete Restabfälle weisen deutlich unterschiedliche Stoffeigenschaften auf. Dieser Abschnitt ermöglicht jedoch den Vergleich der Trocknungsprozesse beider Substrate anhand des erreichten TS-Gehaltes sowie des spezifischen Energieaufwandes (Tabelle 7.4).

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Trocknung von Maissilage mit denen von mechanisch aufbereiteten Restabfällen zeigt sich für die Trocknung von Maissilage ein geringerer spezifischer Energieaufwand sowie eine höhere Verdampfungsgeschwindigkeit. Der Vergleich der Sieblinien beider Substrate (Abbildung 5.9 und Abbildung 5.11) macht deutlich, dass Restabfälle aus wesentlich größeren Komponenten bestehen als Maissilage. Während bei Restabfällen 30% der Komponenten im Bereich unter 8 mm vorliegen, sind es bei Maissilage 85%. Die Form des Trocknungsgutes beeinflusst die Austauschvorgänge des Trocknungsprozesses, sodass die höhere spezifische Oberfläche der Maissilage auf diese Weise einen besseren Wärme- und Stoffübergang des Wassers im Substrat ermöglicht. Auch die Menge an freiem Wasser von Maissilage liegt wegen ihres höheren Feuchtegehaltes und ihrer höheren Homogenität viel höher als bei Restabfall. Restabfälle sind dagegen ein sehr heterogenes Stoffgemisch, sodass die Bindungskräfte der Wasseranteile stärker im Substrat eingebunden sind. Daher muss mehr Energie zur Aufspaltung dieser Bindungskräfte aufgebracht werden.

Tabelle 7.4: Vakuumtrocknung von Restabfall und Silage im Vergleich

<b>Trocknerart</b>	<b>VST Maissilage</b>	<b>VST Restabfall</b>	<b>VST Restabfall</b>
<b>Druck [mbar]</b>	50	50	50
<b>Temperatur [°C]</b>	105	105	90
<b>TS<sub>Input</sub>[%]</b>	37,3	56,3	56,3
<b>TS<sub>Output</sub>[%]</b>	83,5	91,1	86,4
<b>Verdampfungsgeschwindigkeit [l/h]</b>	6,2	4,4	4
<b>Wärme [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,12	1,29	1,19
<b>Strom [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	0,67	0,73	0,76
<b>Summe Energie [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,78	2,02	1,95

### 7.2.4 Energetische Beurteilung der halbtechnischen Anlage

Um die Gesamtanlage energetisch zu beurteilen, wurden zusätzlich Versuche nur mit Wasser durchgeführt. Die Parameter Temperatur und Absolutdruck wurden so wie bei den Versuchen mit Restabfällen (Tabelle 5.11) variiert. Ca. 10 Liter Wasser wurden nach Vorerwärmung der Anlage in den Reaktor gefüllt. Die Behandlungszeit betrug in den meisten Versuchen die benötigte Zeit, um ca. 5 Liter Wasser zu verdampfen. Die spezifische Energie wurde bei jedem der Versuche bestimmt und mit der Verdampfungsenthalpie des jeweils anliegenden absoluten Druckes des Wassers verglichen.

Der absolute Druck von 50 mbar bei 70°C, 90°C und 105°C und von 150 mbar bei 105°C konnte in diesen Versuchen nicht erreicht werden, da bei den Versuchen die Verdampfungsrate höher als das Saugvermögen der Pumpe war (das Wasser hat sehr schnell angefangen zu verdampfen). Während der Solldruck bei allen Behandlungstemperaturen 50 mbar betrug, wurden bei 70°C, 90°C und 105°C nur 83 mbar, 121 mbar bzw. 178 mbar erreicht. Bei dem Versuch mit Sollwerten von 150 mbar und 105°C lag der gemessene Druck bei 208 mbar. Aufgrund dessen liegen die in Abbildung 7.1 dargestellten Werte für die Versuche mit einem Solldruck von 50 mbar (70°C, 90°C und 105°C) und 150 mbar (105°C) über den tatsächlichen spezifischen Energieaufwänden der Anlage bei diesen Absolutdrücken.

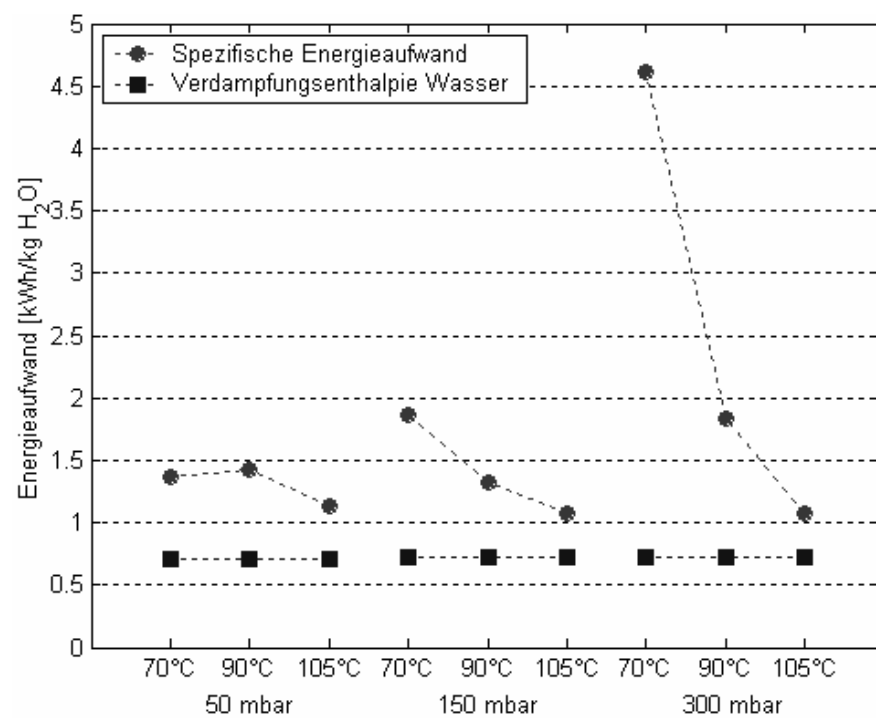


Abbildung 7.1: Spezifischer Energieaufwand und Verdampfungsenthalpie Wasser

Tabelle 7.5: Verdampfungsenergie freien Wassers im Vergleich zum spezifischen Energieaufwand der Vakuum-Siede-Trocknungsanlage

		Spezifischer Energieaufwand [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	
	Behandlungs- temperatur	Verdampfungsenthalpie freies Wasser	Kontinuierlicher Betrieb Vakuumpumpe
50 mbar	70°C	0,69	1,37
	90°C	0,69	1,42
	105°C	0,69	1,13
150 mbar	70°C	0,70	1,87
	90°C	0,70	1,33
	105°C	0,70	1,08
300 mbar	70°C	0,71	4,61
	90°C	0,71	1,84
	105°C	0,71	1,08

In den meisten Fällen hatten die Senkung des Druckes und die Erhöhung der Temperatur eine positive Auswirkung auf den spezifischen Energieaufwand der Anlage. Diese Tendenz wurde auch in den Versuchen mit Maissilage (Abbildung 6.9) und mechanisch aufbereiteten Restabfällen (Abbildung 6.26) gezeigt.

Der Nutzungsgrad (Abbildung 7.2) bezeichnet das Verhältnis zwischen der Verdampfungsenthalpie für freies Wasser und der eingesetzten Energie des Prozesses. Er ist das Maß der Energie, die tatsächlich für die Wasserverdampfung genutzt wurde, ohne Berücksichtigung von Verlusten und Erwärmung der Anlage sowie des Substrates.

In allen Versuchen konnte mit der Trocknung bei 105°C der höchste Nutzungsgrad erzielt werden. Der Trocknungsprozess bei 50 mbar und 90°C hat sich jedoch, wie bei dem Versuch mit Restabfällen schon erläutert, aus energetischer Sicht als am wirtschaftlichsten erwiesen. Das konnte jedoch durch die Versuche mit Wasser nicht bestätigt werden, da der Reaktor nicht die angestrebten absolute Drücke erreicht hat. Die Verdampfungsenthalpie des Wassers entspricht in diesem Fall Werten von über 50% der Gesamtenergiemenge. Ca. 50% der spezifischen Energie wurde für den Betrieb und die Erwärmung der Anlage sowie durch Verluste verbraucht. Der Trocknungsprozess erweist sich für Wasser als energetisch aufwändig, da viel mehr Energie zugeführt wird als für die Verdampfung erforderlich ist.

In Abbildung 7.3 wurden die Nutzungsgrade der Versuche mit mechanisch aufbereiteten Restabfällen aufgetragen. Es wird hierbei angenommen, dass das gesamte verdampfte Wasser als freies Wasser verdampft, da die Mengen an dem im Substrat gebundenen und freien Wasser nicht zu unterscheiden sind.

Unabhängig vom Druck stellen die Versuche mit hoher Temperatur den besten Nutzungsgrad der Anlage dar, wobei bei 50 mbar der Nutzungsgrad für alle untersuchten Temperaturen nahezu identisch sind.

Der Versuch bei 50 mbar und einer Behandlungstemperatur von 90°C stellt den höchsten Nutzungsgrad der Anlage dar, trotz der geringen Abweichungen von den anderen Versuche bei 105°C.

Der Trocknungsprozess ist jedoch energetisch sehr aufwändig, da ca. 64% der Gesamtenergie (50 mbar, 90°C ohne Vorerwärmung) für den Betrieb der Anlage sowie durch Verluste verbraucht wurden.

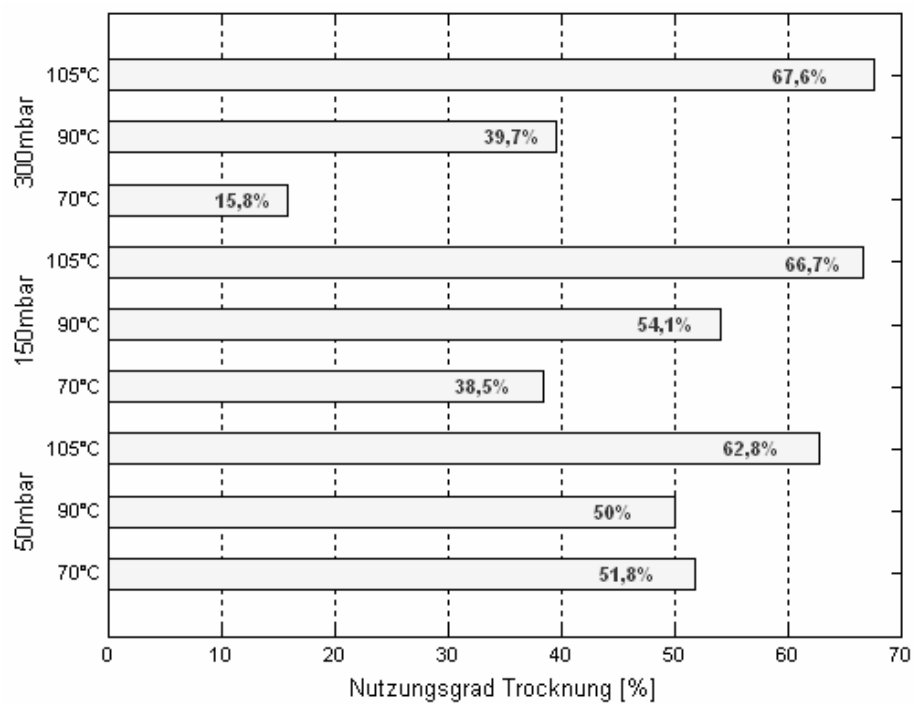


Abbildung 7.2: Nutzungsgrad der Versuche mit Wasser ohne Vorerwärmungsenergie

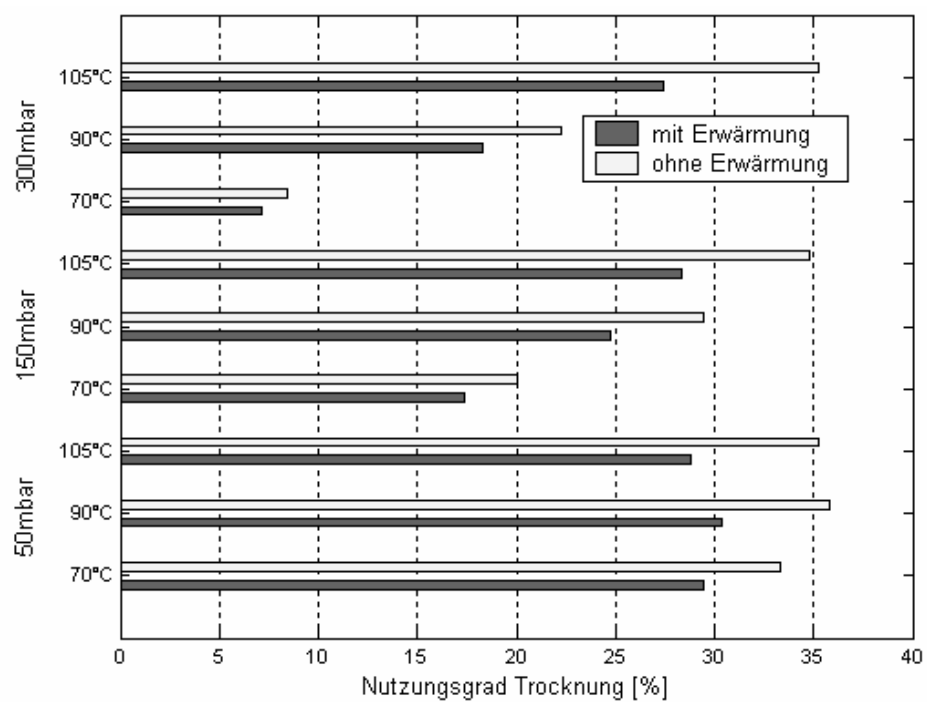


Abbildung 7.3: Nutzungsgrad bei kontinuierlich laufender Vakuumpumpe mit und ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage

### 7.2.5 Optimierungsansätze für die halbtechnische Versuchsanlage

Abbildung 7.4 stellt Ansätze vor, um die Vakuum-Siede-Trocknungsanlage zu optimieren. Die einzelnen Systeme der Anlage mit Verbesserungsmaßnahmen werden im Folgenden beschrieben.

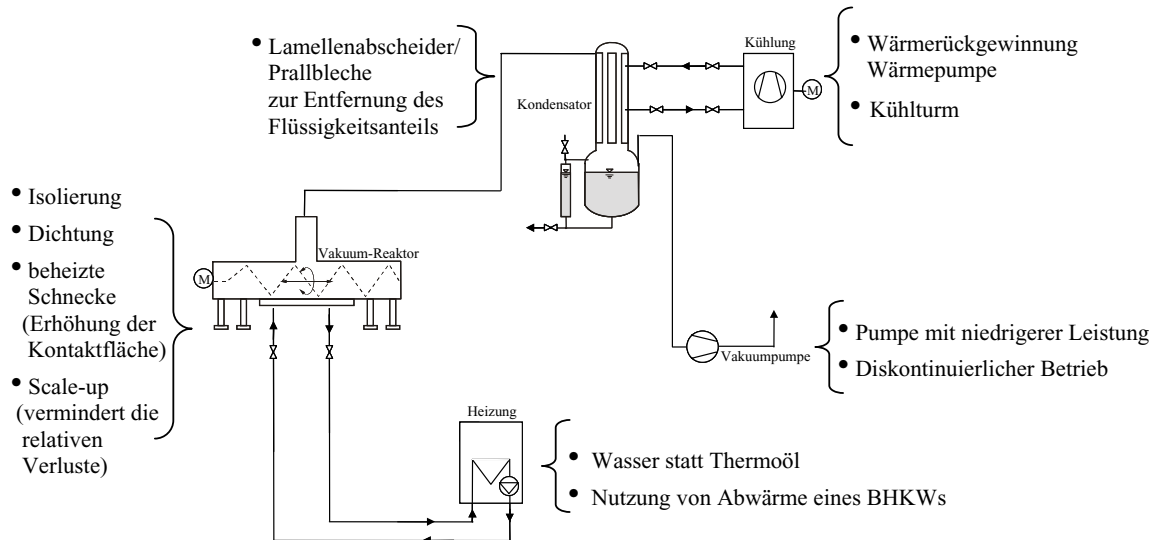


Abbildung 7.4: Optimierungsvorschläge für die Vakuumtrocknungsanlage

#### 1. System – Reaktor:

Im Reaktor besteht die Möglichkeit, die Wärmedämmung zu verbessern. Der Reaktorkörper ist nicht vollständig isoliert. Die Dichtigkeit im Reaktor, insbesondere an der Schnecke, kann optimiert werden. Die während der Versuche aufgetretene Leckstelle am Reaktor wurde durch regelmäßige Einspritzung von Fett behoben. Das Einsetzen einer beheizten Schnecke würde den Wärmetransport im Substrat durch Erhöhung der Kontaktfläche verbessern und den Prozess beschleunigen. Ein Scale-up des Reaktors würde zusätzlich die relativen Verluste der Anlage vermindern.

#### 2. System – Heizung:

Der Vorteil der Nutzung von Thermoöl als Trägermittel ist sein gegenüber Wasser wesentlich höherer Siedepunkt. Thermoöl kann bei atmosphärischem Druck bis zu Temperaturen von 300°C eingesetzt werden. Da die Versuche mit dem geringsten energetischen Aufwand eine Temperatur von 90°C benötigen, erweist sich als Medium Wasser günstiger als Thermoöl. Wasser zeigt eine bedeutend höhere Wärmekapazität (4,2 kJ/kg.K) im Vergleich zu Thermoöl (ca. 2-2,5 kJ/kg.K), sodass der Trocknungsprozess mit Wasser als Medium beschleunigt würde, da mehr Energie in den Reaktor



transportiert werden könnte.

Der Temperaturbereich von 90°C (Versuch mit dem besten spezifischen Energieaufwand) entspricht genau der Abwärme von Betriebsmotoren. Die Abwärmenutzung von einem Motor eines BHKWs (Biogasanlage, Mülldeponie, usw.) zur Erwärmung des Reaktors kann die Energiekosten der Anlage drastisch reduzieren. Der Betrieb der Anlage an Standorten mit ausreichendem Anfall an Abwärme kann daher von großer Bedeutung sein.

### *3. System – Vakuumpumpe:*

Der Leitungsquerschnitt der Anlage sollte so gewählt werden, dass lediglich minimale Druckverluste in der Gesamtanlage auftreten und die Vakuumpumpe ihre maximale Leistung erreicht. Der Ansaugstutzen der Vakuumpumpe hat einen Leitungsquerschnitt von 4,2 cm, während das Druckregelungsventil (vor der Pumpe) und die Leitungsquerschnitte der Anlage jeweils 2,8 cm und 3,35 cm aufweisen. Diese so genannten „Drosseln“ vermindern die Leistung der Pumpe. Leitungswiderstände würden vermindert, wenn alle Leitungen der Anlage sowie auch das Druckregelungsventil den Querschnitt des Ansaugstutzens besäßen.

Bei den Versuchen bei 50 mbar und 105°C erreicht die Anlage erst nach 2,5 Stunden den gewünschten absoluten Druck. Das heißt, das Saugvermögen der Vakuumpumpe ist für diese Verdampfungsrate unterdimensioniert. Hier besteht die Möglichkeit, entweder eine Pumpe mit höherer Leistung zu installieren oder das Kondensationssystem zu optimieren. Die letztgenannte Möglichkeit, wäre wirtschaftlich sinnvoller, da eine Vakuumpumpe mit höherer Leistung den spezifischen Energieaufwand der Anlage erhöht. Mit einer Verbesserung des Kondensationssystems beziehungsweise durch die Verminderung des Wasserdampfes, der durch die Vakuumpumpe geht, könnte auch eine Pumpe mit geringerer Betriebsleistung eingesetzt werden.

Der spezifische Energieaufwand der Vakuumpumpe sowie auch die spezifischen Verluste der gesamten Anlage vermindern sich mit dem Scale-up der Vakuumtrocknungsanlage. Die Vakuumpumpe zeigt ein Saugvermögen von 25 m<sup>3</sup>/h und eine Nennleistung von 0,75 kW. Würde hier eine Vakuumpumpe mit einem Saugvermögen von 63 m<sup>3</sup>/h eingesetzt werden, würde diese eine Nennleistung von 1,5 kW aufweisen. Dies würde den spezifischen Energieaufwand von 0,03 auf 0,02 kWh/m<sup>3</sup> reduzieren.

Ein diskontinuierlicher Betrieb der Vakuumpumpe würde ebenfalls den spezifischen Energieaufwand des Prozesses vermindern. Die Vakuumpumpe des Versuchsstandes läuft kontinuierlich und wird gegebenenfalls durch ein Ventil abgeriegelt, das über

einen Vakuum-Controller gesteuert wird. Dies hat zur Folge, dass die Pumpe über die gesamte Versuchszeit in Betrieb ist und Energie verbraucht, die vom System erfasst wird. Die effektive Pumpenergie wurde durch Herausrechnung des Energieaufwandes während des Betriebes der Pumpe bei geschlossenem Ventil berechnet. Die Abschätzung dieser effektiven Laufzeit wurde mittels der eingestellten Hysterese des Verlaufes des absoluten Druckes bestimmt. Abbildung 7.5 und Tabelle 7.6 zeigen eine grobe Einschätzung der Energieeinsparung durch das unterbrochene Laufen der Pumpe. Der Wert der Laufzeit der Pumpe bei dem Versuch mit 300 mbar ist mit hohen Ungenauigkeiten behaftet, da in diesem Fall die Hysterese des Verlaufs des absoluten Drucks zeitlich sehr dicht aneinander liegt.

Der Versuch bei 300 mbar und 105°C stellt gemäß Berechnung einer diskontinuierlichen Laufzeit der Vakuumpumpe den niedrigsten spezifischen Energieaufwand der Anlage (1,88 kWh/kg H<sub>2</sub>O) dar, gefolgt von den Versuchen bei 150 mbar, 105°C und 50 mbar, 70°C (beide 1,92 kWh/kg H<sub>2</sub>O). Von diesen Versuchen konnte jedoch nur der Versuch bei 150 mbar, 105°C einen TS-Gehalt höher als 80 Gew.-% erreichen. Wird nicht nur der spezifische Energieaufwand sondern auch die Qualität des Outputs berücksichtigt, stellt die Variante 150 mbar, 105°C bei diskontinuierlichem Betrieb der Vakuumpumpe den günstigsten Trocknungsprozess dar (siehe Abbildung 7.5).

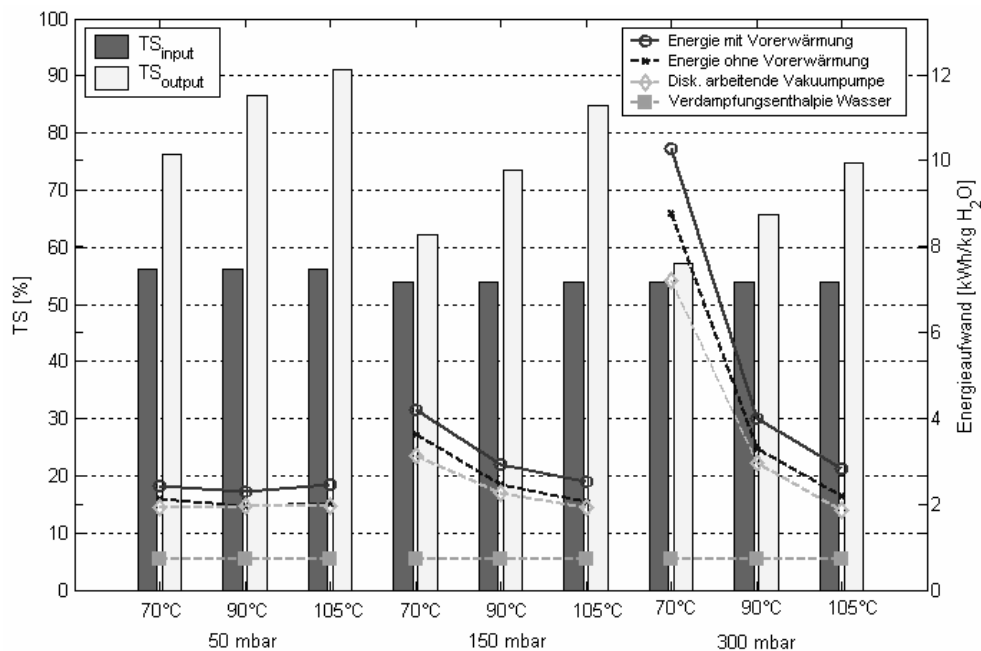


Abbildung 7.5: Gemittelte TS-Werte und spezifischer Energieaufwand

Tabelle 7.6: Vergleich des spezifischen Energieaufwandes der Anlage mit kontinuierlich und diskontinuierlich arbeitender Vakuumpumpe

		kontinuierliche Vakuumpumpe				diskontinuierliche Vakuumpumpe	
		mit Vorerwärmung		ohne Vorerwärmung		ohne Vorerwärmung	
		Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/ kg H <sub>2</sub> O]	Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/ kg H <sub>2</sub> O]	Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/ kg H <sub>2</sub> O]
<b>50 mbar</b>	70°C	25,40	2,41	22,44	2,13	20,22	1,92
	90°C	32,14	2,30	27,18	1,95	27,10	1,94
	105°C	37,70	2,47	30,88	2,02	30,09	1,97
<b>150 mbar</b>	70°C	21,88	4,19	18,92	3,63	16,44	3,13
	90°C	31,08	2,91	26,12	2,45	24,00	2,25
	105°C	36,97	2,54	30,14	2,07	27,85	1,92
<b>300 mbar</b>	70°C	20,32	10,27	17,36	8,78	14,41	7,20
	90°C	27,77	4,00	22,80	3,28	20,66	2,97
	105°C	30,67	2,81	23,84	2,19	21,52	1,88

Hinsichtlich der Substratqualität nach der Trocknung sind die Varianten 50 mbar, 90°C und 150 mbar, 105°C gleichwertig. Die Differenz des berechneten spezifischen Energieaufwandes und des Nutzungsgrades (Abbildung 7.7) dieser beiden Varianten beträgt jeweils nur 1%. Wie schon erwähnt sind bei der Methode zur Abschätzung des Energieverbrauches bei diskontinuierlichem Betrieb der Vakuumpumpe viele Ungenauigkeiten zu erwarten, die im Praxisbetrieb überprüft und optimiert werden müssen.

Abbildung 7.6 stellt die neue prozentuale Aufteilung der Gesamtenergie der Anlage bei Einsatz einer diskontinuierlich laufenden Vakuumpumpe. Hier beträgt der Anteil der Vakuumpumpe 1-9% des gesamten Energieaufwandes gegenüber 10-18% bei kontinuierlichem Betrieb (Abbildung 6.36), was das Potential zur Senkung des spezifischen Energieaufwandes der Anlage verdeutlicht.

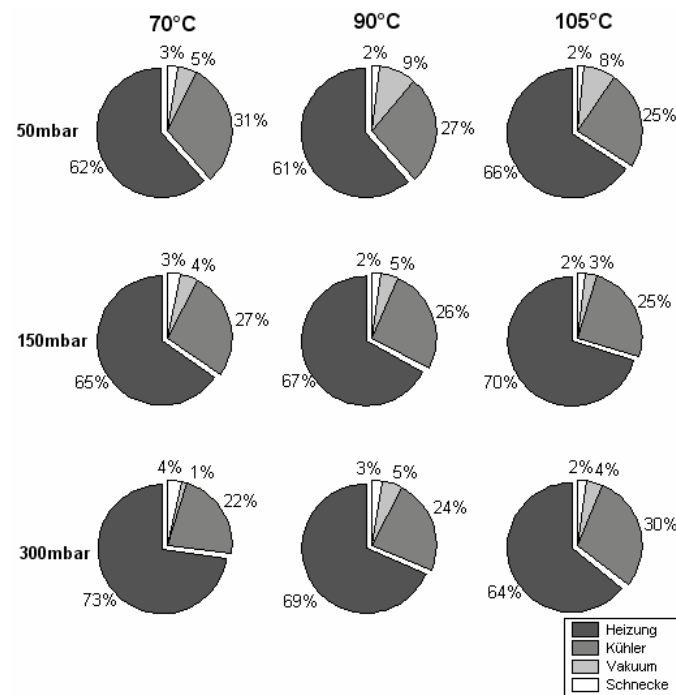


Abbildung 7.6: Energiebilanz – Anteile der einzelnen Anlagenteile am Gesamtenergieverbrauch bei diskontinuierlich laufender Vakuumpumpe (ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage)

In Abbildung 7.7 ist der energetische Nutzungsgrad bei kontinuierlich laufender Vakuumpumpe mit und ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage sowie bei diskontinuierlichem Betrieb der Vakuumpumpe ohne Vorerwärmung aufgetragen. Der diskontinuierliche Betrieb der Vakuumpumpe stellt erwartungsgemäß immer die günstigere Variante dar.

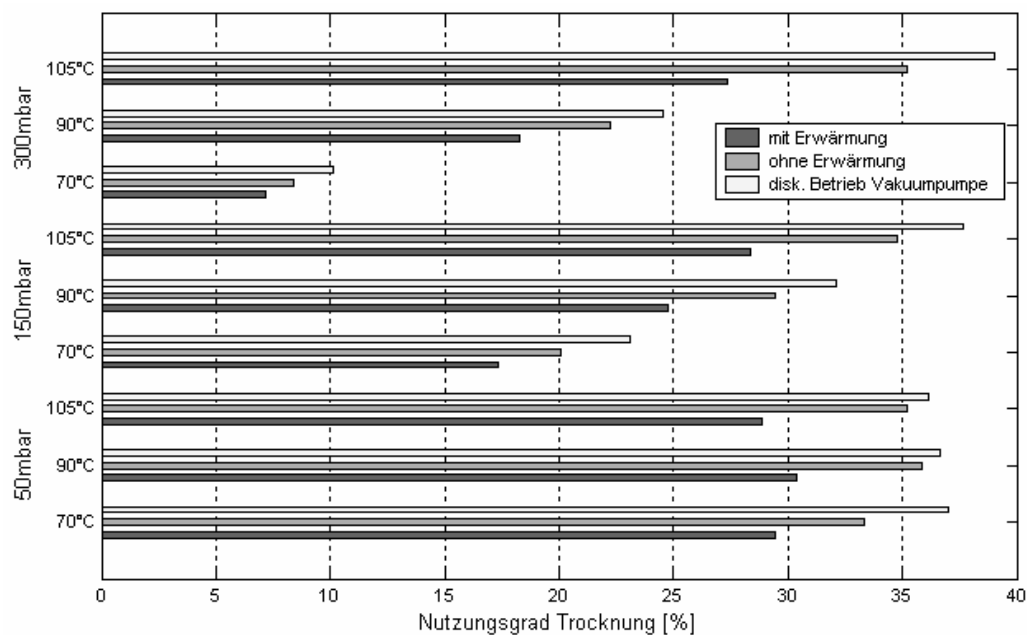


Abbildung 7.7: Nutzungsgrad bei kontinuierlich laufender Vakuumpumpe mit und ohne Energie zur Vorerwärmung der Anlage sowie bei diskontinuierlichem Betrieb der Vakuumpumpe

#### 4. System – Kondensator und Kältemaschine:

Der Dampf, der im Kondensator verflüssigt wird, entspricht mehr als 90% des gesamten Wasserdampfes der Anlage (Versuche bei 50 mbar). Ca. 10% des Wasserdampfes (zwischen 0,5 und 2 kg Wasser) werden durch die Abluft an die Umgebung abgegeben. Eine Optimierung des Kondensators gewinnt im Hinblick auf die hohe Belastung der Abluft (Abbildung 6.32) an Bedeutung.

Wasserdampf in der Abluft bedeutet darüber hinaus auch ein Risiko für die Vakuumpumpe. Kondensation in der Pumpe führt zu einer drastischen Verschlechterung der Leistungsdaten. Besonders in Drehschieberpumpen mit Öl als Betriebsmittel, wie im Versuch verwendet, werden durch Ölverdünnung die Leistungsdaten beeinträchtigt. Eine höhere Leistung der Vakuumpumpe ist zu erwarten, wenn das Kondensationssystem optimiert wird. Diese Maßnahme würde außerdem vor Korrosionsschäden an der Pumpe schützen.

Zur Entfernung von Flüssigkeitsanteilen in der Abluft könnte vor der Pumpe am Kondensator ein Prallabscheider eingesetzt werden. Die strömungsgünstig geformten Abscheiderprofile lenken den mit Flüssigkeit beladenen Gasstrom um. Diese Umlenkung können die Tropfen aufgrund ihrer Trägheit nicht vollziehen, sondern prallen auf die Abscheiderflächen (Prallflächenabscheider). Dabei entsteht ein Flüssigkeitsfilm, der dann nach unten abläuft (Abbildung 7.8). Dadurch wird der Teil der Staubmenge

im Kondensat erhöht. Um die Massenbilanz des Staubes zu betrachten, könnte eine zweite Staubmessungsapparatur vor dem Kondensator eingesetzt werden.

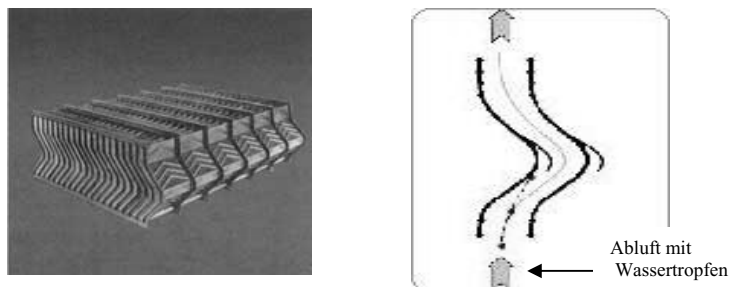


Abbildung 7.8: Prallabscheider zur Entfernung von Flüssigkeitsanteilen im Abluftrohr

Die Nutzung der Kondensationswärme zur Erwärmung des Reaktors stellt einen Optimierungsansatz für den Energieaufwand der Anlage dar. Dieser Anteil entspricht ca. 30% des Gesamtverbrauches des Prozesses. In Tabelle 7.7 ist das Ergebnis einer Berechnung dargestellt, das zeigt, dass der spezifische Energieaufwand der Anlage durch Rückgewinnung der Kondensationswärme auf 1,36 kWh/kg H<sub>2</sub>O reduziert werden kann.

Tabelle 7.7: Spezifischer Energieaufwand bei 50 mbar und 90°C mit Rückgewinnung der Kondensationswärme

Energie [kWh]	spez. Energie [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	Kondensations- wärme [kWh]	Energie (Wärme- rückgewinnung) [kWh]	spez. Energie (Wärme- rückgewinnung) [kWh/H <sub>2</sub> O]
27,18	1,95	8,26	18,92	1,36

Die Rückgewinnung der Kondensationswärme (Gleichung 3.9 mit spezifischer Wärme des Wassers) kann durch Anwendung einer Wärmepumpe erfolgen. Die Abbildung 7.9 zeigt das Arbeitsprinzip einer Wärmepumpe. Wärmepumpen produzieren Heizenergie ohne Schadstoffe freizusetzen. Ca.  $\frac{3}{4}$  der Heizenergie kommen bei Wärmepumpen aus dem Wasserrücklauf der Kältemaschine. Die Wärmepumpe hebt die mit Hilfe von Wärmetauschern aufgenommene Wärme auf das für Heizzwecke gewünschte Temperaturniveau an. Dies geschieht in einem geschlossen Kreislaufprozess durch ständiges Ändern des Aggregatzustandes des Arbeitsmittels (Verdampfen, Komprimieren, Verflüssigen, Expandieren). Wärmepumpen sind in der Trocknungstechnik üblich. Mehr Details über die Funktionsweise der Wärmepumpe sind bei Ochsner [60] zu finden.

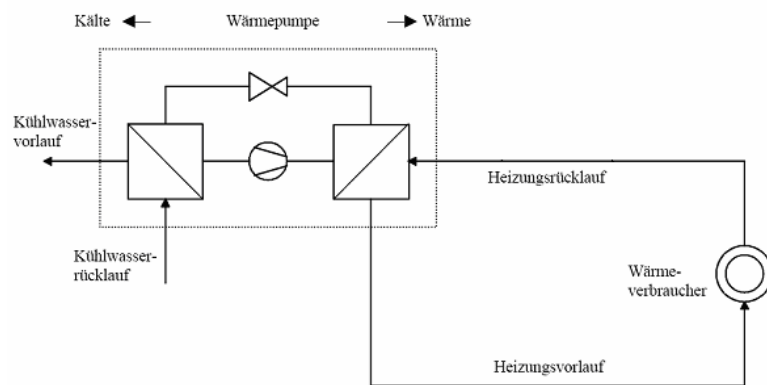


Abbildung 7.9: Funktionsschema einer Wärmepumpe mit Abwärmenutzung zur Heizwärmeversorgung

Eine andere Möglichkeit ist, den Kondensator mit einem Kühlturm zu betreiben. Bei einem Kühlturm handelt es sich um ein Verfahren mit direkter Kühlung durch Zwangsbelüftung (Gebläse). Dieses ist die wirtschaftlichste Form der Wasserrückkühlung.

### 7.2.6 Regressionsmodell

Die Nichtlinearität einer Gleichung ist entscheidend, wenn die Lage eines Maximal- oder Minimalwertes gesucht ist. Um die maximale Trocknungsgeschwindigkeit ( $v$ ) in Abhängigkeit von dem Druck ( $p$ ) und der Temperatur ( $T$ ) zu bestimmen, wurde ein quadratisches Modell verwendet. Die Berechnung des angepassten Regressionsmodells erfolgte mit dem Programm Statistica Version 5.0 und ist im Folgenden beschrieben:

$$v = \beta_0 + \beta_1 \cdot p + \beta_2 \cdot p^2 + \beta_3 \cdot T + \beta_4 \cdot T^2 + \beta_5 \cdot p \cdot T + \beta_6 \cdot p \cdot T^2 + \beta_7 \cdot p^2 \cdot T + \beta_8 \cdot p^2 \cdot T^2 \quad (7.1)$$

mit den Koeffizienten  $\beta_i$ :

$$\begin{array}{lll} \beta_0 = -4,22 & \beta_1 = -8,49 \cdot 10^{-3} & \beta_2 = 4,03 \cdot 10^{-5} \\ \beta_3 = 19,11 \cdot 10^{-2} & \beta_4 = -1,04 \cdot 10^{-3} & \beta_5 = -7,80 \cdot 10^{-4} \\ \beta_6 = 8,33 \cdot 10^{-6} & \beta_7 = 9,11 \cdot 10^{-7} & \beta_8 = -1,39 \cdot 10^{-8} \end{array}$$

Das Modell gilt nur in dem untersuchten Druck- und Temperaturbereich von  $70 \leq T \leq 105^\circ\text{C}$  und  $50 \leq p \leq 300$  mbar.

Die Varianzanalyse (ANOVA) wurde eingesetzt, um die Signifikanz des Koeffizienten des Regressionsmodells, den so genannten p-Wert, zu bewerten. Da der p-Wert kleiner als 0,001 ist, besitzt das verwendete Modell Signifikanz. Um die Residuen (Abweichungen der Einzelwerte von den Gruppenmittelwerten) zu beurteilen, wurden sie in ein Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen. Da das Wahrscheinlichkeitsnetz näherungsweise auf einer Gerade liegt, besitzt das verwendete Modell mathematische Konsistenz [30].

Abbildung 7.10 und Abbildung 7.11 zeigen die grafische Darstellung als Wirkungsfläche bzw. Höhenliniendiagramm der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur und dem absoluten Druck mit dem angepassten Regressionsmodell.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass je geringer der absolute Druck bzw. höher die Temperatur ist, desto schneller der Trocknungsvorgang erfolgte. Bei einem absoluten Druck von 50 mbar und einem Temperaturbereich zwischen  $100^\circ\text{C}$  und  $105^\circ\text{C}$  liegt annähernd identische Trocknungsgeschwindigkeit vor. Die ermittelte günstigste Variante aus den letzten Abschnitten lag bei einer Behandlungstemperatur von  $90^\circ\text{C}$  (50 mbar). Die Durchführung von weiteren Versuchen bei ca.  $100^\circ\text{C}$  ist zu empfehlen, um den spezifischen Energieaufwand mit dem Versuch bei  $90^\circ\text{C}$  zu vergleichen.



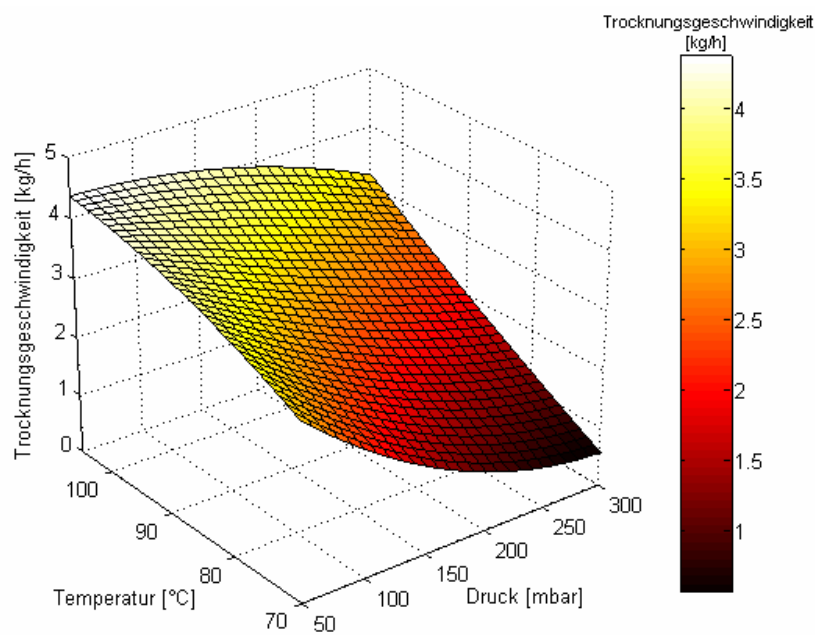


Abbildung 7.10: Wirkungsfläche der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Behandlungstemperatur und Unterdruck mit dem angepassten Regressionsmodell

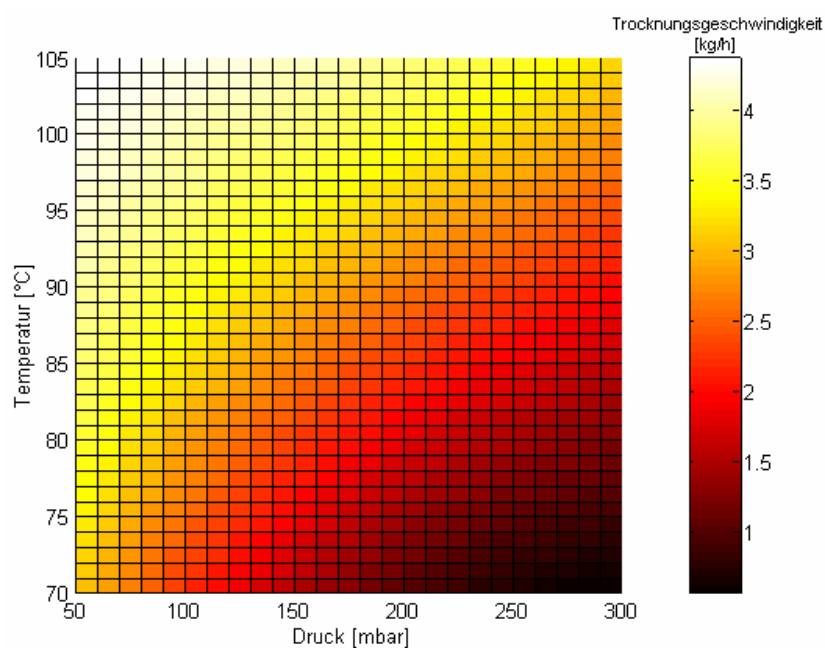


Abbildung 7.11: Höhenliniendiagramm der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Behandlungstemperatur und Unterdruck mit dem angepassten Regressionsmodell

## 7.3 Großtechnische Versuchsanlage

Die Untersuchungen in der großtechnischen Versuchsanlage zeigen die grundsätzliche Eignung der Vakuum-Siede-Trocknung als Verfahren zur Trocknung von Abfallstoffen. Während bei aeroben Trocknungsverfahren Wassergehalte unterhalb 15% nicht erreicht werden können, konnte bei Abfällen mit TS-Gehalten von z.B. 48,8 und 69,3 Gew.-% mittels Vakuum-Trocknung ein Wassergehalt nach Trocknung von 13,7 bzw. 10,5 Gew.-% verwirklicht werden (siehe Abbildung 6.38). Hierbei wurde bei allen Versuchen eine Behandlungstemperatur von 105°C und ein absoluter Druck von 50 mbar angewendet.

Der Trocknungsvorgang durch die Vakuum-Siede-Trocknung konnte durch aerobe Vorwärmung des Substrates von ca. 12 bis 24 Stunden vor der Befüllung verkürzt werden. Alle Substrate wurden auf < 60 mm abgesiebt. Abhängig vom Substratumfang benötigte der Trocknungsprozess Behandlungszeiten zwischen 2 und 4 Stunden.

Durch die Durchmischung des Substrates wurden Abfallbestandteile wie Gebinde, Windelinhalt, Karton-Verbund-Verpackungen und biologisch abbaubare Organik zerkleinert, sodass das Trockenprodukt eine sehr gute Homogenität aufgewiesen hat. Probleme bei der Weiterkonfektionierung (Pelletierung, Zwischenlagerung, usw.) werden dadurch reduziert. Das getrocknete Produkt zeigt sich auch für Prozesse wie Stoffstromtrennung geeignet (z.B. Siebung, Windsichtung und Schwerstoffscheidung, Fe- und NE-Scheidung).

Die spezifischen Energieaufwände der Anlage für die untersuchten Substrate sind in Tabelle 6.10 dargestellt. Wie schon erwähnt, ist bei dieser Betrachtung nur der Energieaufwand der Anlage während des Betriebes der Vakuumpumpe und ohne die benötigte Energie um den Reaktor vorzuwärmen berücksichtigt. Wegen des händischen Betriebes des Schneckenförderers des Reaktors zur Beladung und Entleerung sowie der Aussortierung von Störstoffen aus dem Substrat kam es zu einem zusätzlichen Zeitaufwand zwischen 4 und 5 Stunden bzw. zu einem energetischen Mehraufwand.

Der spezifische Energieaufwand des Versuches mit Restabfällen (1,14 kWh/kg verdampftes H<sub>2</sub>O) wurde mit im Markt etablierten physikalischen Trocknungsverfahren wie z.B. Trommel- und Bandtrocknern verglichen (Tabelle 7.8). Wie bei der halbtechnischen Versuchsanlage wurden Daten aus der Trocknung von Grünabfall verwendet. Bei dem Vergleich ist einschränkend zu berücksichtigen, dass die Wasserhaltefähigkeit bzw. Wasserbindung holziger Bestandteil (Grünabfälle) intensiver ausfällt als bei so genannter Weichorganik (Bio- und Restabfälle) und somit für die Trocknung

von Grünabfällen tendenziell höhere Energieaufwendungen zu veranschlagen sind. Die großtechnische Vakuumtrocknungsanlage benötigt im Vergleich zu dem Band- und Trommeltrockner einen niedrigeren spezifischen Energieaufwand.

Tabelle 7.8: Vergleich des spezifischen Energieaufwandes des großtechnischen Vakuumtrockners mit einem Bandtrockner und Trommeltrockner

<b>Trocknerart</b>	<b>VST - 50 mbar/105° C ohne Vorerwärmung</b>	<b>Band- trockner</b>	<b>Trommel- trockner</b>
<b>Substrat</b>	<b>Restabfall</b>	<b>Grünabfall</b>	<b>Grünabfall</b>
<b>TS<sub>Input</sub> [%]</b>	48,8	65	65
<b>TS<sub>Output</sub> [%]</b>	86,3	90	90
<b>Art der Beheizung</b>	Indirekt	Indirekt	Direkt
<b>Wärme [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	0,56	0,99	1,07
<b>Strom [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	0,58	0,24	0,68
<b>Summe Energie [kWh/kg H<sub>2</sub>O]</b>	1,14	1,23	1,75

Die Vakuum-Siede-Trocknung stellt im Vergleich mit den vorgestellten physikalischen Trocknungsverfahren (Trommel- und Bandtrocknern) aus energetischer Sicht ein interessantes Trocknungsverfahren dar. Ein besonderer Vorteil besteht auch hinsichtlich des Abluftvolumens, die bei atmosphärischem Betrieb von physikalischen Trocknungsverfahren sehr hoch ausfällt.

Beim Vergleich der Daten aus Tabelle 7.8 ist aus ökonomischen Gründen zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie zu differenzieren. In der Regel fallen die spezifischen Kostenaufwendungen für Wärmeenergie geringe aus als die für elektrische Energie.

Im Allgemeinen liegt beim Trocknen von wasserhaltigen Gütern der spezifische Heizenergiebedarf nach Kröll [42] zwischen 0,83 und 1,39 kWh/kg verdampfter Feuchte. Werte unter 0,83 kWh/kg werden als niedriger energetischer Verbrauch, Werte über 1,39 kWh/kg als hoher energetischer Verbrauch bezeichnet. Hinsichtlich dieser Literaturwerte stellt die Trocknung von Restabfällen bei der großtechnischen Versuchsanlage einen Trockner mit mittlerem Energieverbrauch dar (siehe Tabelle 7.8). Hohe

Werte des spezifischen Heizenergiebedarfes bedeuten jedoch nicht, dass der Trockner ungünstig arbeitet [42], da der Trocknungsprozess auch anhand anderer spezifischer Eigenschaften beurteilt wird, wie beispielsweise der Qualität der Emissionen.

Hinsichtlich der Kondensatqualitäten wies das Kondensat bei der Vakuum-Siedetrocknung eine höhere CSB-Belastung auf (zwischen 1837 bis 3700 mg/l).

Der Trocknungsprozess produziert ein Abluftvolumen unterhalb von 1 m<sup>3</sup>/Mg FS Anlagen-Input. Eine Untersuchung der Abluftqualität wurde nicht durchgeführt.

Aufgrund der hohen Menge an Substrat, des Zeitaufwandes, um einen Versuch durchzuführen, und dem damit verbundenen Kostenaufwand wurden die Versuche nur einmal pro untersuchtem Substrat realisiert.

## 7.4 Vergleich der Vakuum-Siede-Trocknungsanlagen mit einem biologischen Trocknungsverfahren

In den letzten Abschnitten wurden die halbtechnischen und großtechnischen Versuchsanlagen mit physikalischen Trocknungsverfahren bezüglich des spezifischen Energieaufwandes verglichen. In diesem Abschnitt wird der Energieaufwand einer biologischen Trocknung mit Umluftbetrieb und Abluftbehandlung über eine RTO [15] mit dem der Vakuumtrocknung in der großtechnischen und halbtechnischen Versuchsanlage sowie der Laboranlage verglichen.

Wie in Tabelle 7.9 zu sehen ist, stellt das biologische Trocknungsverfahren energetisch betrachtet eine günstigere Variante als die Trocknung unter Vakuum dar. Die Tabelle zeigt den Gesamtenergiebedarf pro 1 Mg Feuchtsubstrat. Die Werte der biologischen Trocknung entsprechen der benötigten Energie, um Restabfälle von 60 auf 85 Gew.-% TS-Gehalt zu trocknen. Um die erzeugte biologische Wärme zu berechnen, wurde ein Aufwand von 0,722 kWh Wärmeenergie, um einen Liter Wasser zu verdampfen, angenommen. Durch den Abbau von 1 kg oTS wird eine Menge von 6 kWh abgegeben. Die Trocknung von 1 Mg Restabfall entspricht einem Wasserentzug von ca. 300 Litern. Das entspricht der in der Tabelle enthaltenden 216 kWh, sodass eine Menge von 35 kg oTS abgebaut werden muss [15].

Erwartungsgemäß besitzt die großtechnische Versuchsanlage einen niedrigeren Energieaufwand (333,2 kWh/Mg FS) als die Laboranlage (1808,8 kWh/Mg FS) und die halbtechnische Versuchsanlage (573,5 kWh/Mg FS).

Die wesentlichen Vorteile der Vakuumtrocknung, im Vergleich zu der biologischen Trocknung, sind die wesentlich kürzere Behandlungsdauer und das minimale Abluftvolumen. Die Dauer der biologischen Trocknung kann je nach Verfahrenstechnologie zwischen 7-21 Tagen betragen [16], während die Vakuum-Siede-Trocknungsanlage ein getrocknetes Substrat mit 85 Gew.-% Trockensubstanz nach einer Behandlungsdauer von ca. 3 bis 4 Stunden erreichen kann. Der Abluftumfang bei der biologischen Trocknung ist wesentlich höher als bei der Vakuumtrocknung (bei MBS ca. 1000-2100 m<sup>3</sup> und Endrotteverfahren 90000 m<sup>3</sup> pro Mg FS nach Wiemer [89] und Fricke [15]), sodass zusätzlich Kosten für die Abluftreinigung, wie z.B. RTO-Abluftbehandlung bei biologischer Trocknung, anfallen. Die Vakuum-Siede-Trocknungsanlage weist dagegen ein sehr geringes Abluftvolumen ( $< 1 \text{ m}^3/\text{Mg FS}$ ) auf.

Tabelle 7.9: Vergleich des Energieaufwands der untersuchten Vakuumtrocknungsanlagen mit einer biologischen Trocknung

Trocknerart	Biologische Trocknung	Vakuumtrocknung		
		größtechnische Versuchsanlage	halbtechnische Versuchsanlage	Laboranlage
	1 Mg	1 Mg	1 Mg	1 Mg
Elektrischer Energieverbrauch [kWh/H <sub>2</sub> O]	32,5	169,5	223,5	1808,8
OTS-Verbrauch zur biologischen Erwärmung [kg]	35	-	-	-
Entspricht Wärmeenergieaufwand [kWh]	216	-	-	-
Erdgasverbrauch RTO [kWh]	21,8	-	-	-
Thermischer Energieaufwand [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	-	163,7	350	-
Gesamtenergieaufwand [kWh/kg H <sub>2</sub> O]	270,4	333,2	573,5	1808,8



## Kapitel 8

# Schlussfolgerung und Empfehlungen

In dieser Arbeit wurde das Verfahren der Vakuum-Siede-Trocknung anhand einer Laboranlage, einer halbtechnischen und einer großtechnischen Versuchsanlage untersucht. Die Ergebnisse zeigen die grundsätzliche Anwendbarkeit der Technologie zur Trocknung von Maissilage, Restabfällen und Perkulations- sowie Extraktionsrückständen aus der Bio- und Restabfallbehandlung.

Untersuchungsschwerpunkt war die Trocknungsleistung anhand der nach definierten Zeiträumen erreichten Trockensubstanzgehalte bei Variation der Trocknungsparameter Manteltemperatur und Absolutdruck und der Identifizierung möglichst energieeffizienter Parameterkombinationen. Zusätzlich wurden orientierende Untersuchungen zu den Belastungen entstehender Kondensate und Abluftvolumenströme zur Verfahrensbewertung herangezogen.

Eine Laboranlage diente zur Durchführung von Reihenuntersuchungen insbesondere zur Ermittlung der Temperatur- und Verweilzeitabhängigkeit. Für diese Versuchsreihen konnten jeweils nur geringe Substratmengen verwendet werden. Aufgrund der Inhomogenität von Abfallstoffen wurde hierbei ausschließlich Maissilage verwendet. Die Erfahrungen dieser Versuche bildeten die Grundlage für die Planung und den Bau einer halbtechnischen Versuchsanlage sowie der Entwicklung weiterführender Reihenuntersuchungen. Die Untersuchungen zur Funktionalität unter Praxisbedingungen der

Vakuumtrocknung erfolgten auf einer großtechnischen Anlage.

Hohe Trocknungsleistungen konnten durch Verwendung hoher Temperaturgradienten – Mantel-/Substrattemperatur - ( $90^{\circ}\text{C}$  /  $105^{\circ}\text{C}$  bei 50 mbar) erzielt werden. Bei einer Mantelheiztemperatur von  $90\text{--}105^{\circ}\text{C}$  konnten Substrate mit einem Trockensubstanzgehalt von 31-69 Gew.-% auf Gehalte von über 85 Gew.-% getrocknet werden (Verweilzeit 2-4,5 h) bei spezifischen Energieaufwendungen von 1,14-2,02 kWh/kg verdampfter Wassermasse.

Wie die Versuche mit unterschiedlichen Trocknungstemperaturen gezeigt haben, sind deutlich höhere Temperaturen als die mit dem jeweils anliegenden Absolutdruck korrespondierenden Siedetemperaturen nötig, um aufgrund des anliegenden Temperaturgradienten hinreichend hohe Verdampfungsleistungen zu erzielen.

Das getrocknete Produkt aus der Vakuumtrocknung erfüllt aufgrund seines hohen Trockensubstanzgehalts somit die wesentliche Voraussetzung für einen Einsatz als Ersatzbrennstoff. Die durch die Trocknung erreichte biologische Stabilität ermöglicht eine Zwischenlagerung des Produktes unter weitgehendem Ausschluss weitergehender biologische Umsetzungsvorgänge.

Mit Erhöhung des absoluten Druckes im Trocknungsreaktor sind zur Aufrechterhaltung weiterhin hoher Temperaturgradienten höhere Trocknungstemperaturen zu wählen. Hinsichtlich der einzubringenden Wärmeenergie sind in diesem Fall höhere spezifische energetische Aufwendungen zu erbringen. Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass hohe Temperaturgradienten zu einer Reduktion des gesamten spezifischen Energieaufwandes beitragen. Bei geringem absoluten Druck (z.B. 50 mbar) ist zudem die Variation des spezifischen Energieaufwandes bei den verschiedenen Temperaturgradienten geringer (bei kontinuierlichem sowie diskontinuierlichem Betrieb der Vakuumpumpe).

Im Versuch bei 50 mbar,  $105^{\circ}\text{C}$  wurde die höchste Trocknungsgeschwindigkeit erreicht, da die Trocknungsgeschwindigkeit mit Erhöhung des Temperaturgradienten und Vakuums zunimmt. Diese Variante wies jedoch höhere Energieverluste durch Wärmeverluste an die Umgebung auf als vergleichsweise der Versuch bei 50 mbar,  $90^{\circ}\text{C}$ . Das energetisch beste Versuchsergebnis im Rahmen der halbtechnischen Versuche konnte bei einer Temperatur von  $90^{\circ}\text{C}$  und einem absoluten Druck von 50 mbar erzielt werden.

Bedingt durch das dynamische Trocknungsprinzip, wies das Trocknungsgut bezüglich dessen Trockensubstanzgehaltes eine gute Homogenität auf. Das ständige Umwäl-



zen während des Trocknungsvorganges hat zu einer Homogenisierung des Substrates geführt sowie gleichmäßige Trocknungsvorgänge bewirkt und somit die Konfektionierungseigenschaften des Trockengutes (Stoffstromtrennung, Störstoffscheidung, Pelletierung, Lagerung) verbessert. Zudem konnte durch das stetige Überwerfen und durch das Einwirken von Scherkräften (Vergrößerung der spezifischen Oberfläche) der Austrag des gebundenen Wassers begünstigt werden.

Zur Beurteilung der Versuchsergebnisse wurde u.a. der Energieaufwand herangezogen. Energetisch haben sich – gemessen an der spezifischen Verdampfungsleistung – insbesondere Absolutdruck-Temperatur-Kombinationen mit relativ hohen Temperaturen (90-105°C) und niedrigen Absolutdrücken (ca. 50 mbar) als geeignet erwiesen. Die großtechnische Versuchsanlage wies bei der Trocknung von Restabfällen im Vergleich zu Band- und Trommeltrocknern bezüglich des Gesamtenergieaufwandes geringere spezifische Energieverbräuche auf und kann nach Werten von Kröll [42] als eine Trocknungsanlage mit mittlerem Energieverbrauch eingeordnet werden. Die halbtechnische Versuchsanlage benötigt dagegen mehr Energie. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei den Band- und Trommeltrocknern um Großanlagen, dimensioniert für jeweils 1.700 Mg TS/a und 8.600 Mg TS/a handelt, wobei geringere relative Energieverluste sowie ein geringerer spezifischer Energieaufwand als bei den für Versuchszwecke entwickelten Pilotanlagen auftreten [1].

Die besten Trocknungstemperaturen der Anlagen (90-105°C) entsprechen der Abwärme klassischer Blockheizkraftwerke, wie sie auf vielen Anlagen und Deponiestandorten installiert sind [77]. Durch die Nutzung der Abwärme kann die Vakuum-Siedetrocknung zusätzliche energetische und somit ökonomische Anreize erfahren.

Trotz des hohen Temperaturgradienten konnten im Verlauf der Reihenuntersuchungen und der Versuche an der großtechnischen Anlage keine Probleme mit Inkrustierungen oder Verklebungen an der Innenseite des Heizmantels bzw. Reaktorkörpers beobachtet werden.

Aussage zur Korrosionsproblematik können nur eingeschränkt getroffen werden. Bedingt durch den Batchbetrieb (häufiger Wechsel des Vakuums mit atmosphärischer Luft während der Befüll- und Entleerungsvorgänge), des Temperaturwechsels und des Auftretens des sauren Kondensates ist nicht zu erwarten, dass das Vakuum-Siede-Verfahren weniger Korrosionsangriffen ausgesetzt ist als Verfahren, die mit atmosphärischer Luft arbeiten.

Im Vergleich zu biologischen und atmosphärisch-physikalischen Trocknungsanlagen entstanden bei der Vakuum-Siede-Trocknungsanlage nur minimale Abluftvolumina

(< 1 m<sup>3</sup>/Mg). Die Abluft wies signifikante Belastungen auf und muss vor Abgabe an die Umgebung behandelt werden.

Die Vakuumtrocknung als innovativer Prozess stellt durch den vergleichsweise geringen spezifischen Energieverbrauch, die Qualität des getrockneten Substrates und die geringen Abluftmengen grundsätzlich eine interessante Alternative zu bisherigen Verfahren dar. Insbesondere im Hinblick auf die Anforderungen an die Abluftbehandlung (30. BImSchV) ist die minimale Abluftentstehung ein wichtiger Aspekt.

Nicht in die Betrachtung aufgenommen sind energetische Einsparungen durch die äußerst geringen Abluftvolumina. Diese werden in der Abluftreinigung zu Einsparungen gegenüber Aufwendungen zur Abluftbehandlung – beispielsweise für Trommeltrocknungsanlagen – führen.

Als wesentliche Vorteile der Vakuumtrocknung im Vergleich zu der biologischen Trocknung sind die deutlich kürzere Behandlungsdauer und die minimale Abluftmenge zu nennen.

In den Untersuchungen wurde der spezifische Energieaufwand der Anlage nur während der Laufzeit der Vakuumpumpe berücksichtigt. Im Rahmen der großtechnischen Untersuchungen musste ein zusätzlicher Zeitaufwand von ca. 4-5 Stunden für die Beladung, Entleerung und allgemeine Versuchsvorbereitungen in Ansatz gebracht werden, wodurch auch ein energetischer Mehraufwand entstand. Die Effizienz des Prozesses hängt daher auch von der Ausführung von Optimierungsansätzen der Anlage ab (z.B. Automatisierung der Beladung, Entleerung, Störstofftrennung usw.).

Neben Maissilage sind auch weitere landwirtschaftliche Energiepflanzen (Grassilage, Getreide, Raps usw.) sowie Bioabfälle von den Eigenschaften her potentiell für die Vakuumtrocknung geeignet.

Investitions- und Betriebskosten wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Gleiches gilt hinsichtlich von Aussagen zur erforderlichen Peripherietechnologie bzw. zu einer Gesamtkonzeption.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können als Grundlage für die Planung der Prozessteuerung einer Großanlage dienen. Die untersuchten betrieblichen Parameter (wie z.B. Behandlungsdruck, Behandlungstemperatur) sowie die zur Massenbilanz und Wärmeenergiebilanz sind wesentliche Informationen zur Konzeptionierung einer großtechnischen Anlage. Der aus den Untersuchungen resultierende weiterführende Untersuchungsbedarf ist nachfolgend stichwortartig aufgeführt:

- Aus dem Regressionsmodell der Trocknungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und dem absoluten Druck ist die Trocknungsgeschwindigkeit bei einer Temperatur von ca. 100°C höher als bei der in dieser Arbeit günstigsten Variante (50 mbar, 90°C). Die Durchführung einer weiteren Versuchsreihe bei 50 mbar und 100°C ist zu empfehlen, um den spezifischen Energieaufwand dieses Versuches mit der bisher günstigsten Variante zu vergleichen.
- Maßnahmen zur Minimierung der Energieverbräuche sind voranzutreiben.

Im Verlauf der Versuchsdurchführung wurden überschlägige Berechnungen durchgeführt, die aufzeigen, dass der spezifische Energieaufwand durch einen diskontinuierlichen Betrieb der Vakuumpumpe verringert werden kann. Diese Ergebnisse sind durch den Einsatz einer regelbaren Vakuumpumpe mit automatisierter Ausschaltung bei geschlossenem Ventil experimentell zu überprüfen. Weiterhin ist der Wärmerückgewinnung ein hoher Stellenwert beizumessen.

Im Vakuum wird die Wärmeleitung verringert. Eine Steigerung der Verdampfungsleistung könnte mittels einer Wärmezufuhr durch Infrarot-Strahlungsheizung erreicht werden [50].

Weiterhin könnte eine beheizte Schnecke zur Durchmischung des Substrates den Wärmetransport im Substrat durch Erhöhung der Kontaktfläche verbessern sowie den gesamten Prozess beschleunigen.

Die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Energierückgewinnung erscheint als eine weitere wesentliche Option zur Minimierung des Energiebedarfs.

Für den Bau einer Großanlage ist ein Gesamtkonzept zu erarbeiten, in das insbesondere Aspekte der Prozesswasseraufbereitung und der mechanischen Aufbereitung vor der Vakuum-Siede-Behandlung besondere Berücksichtigung finden müssen. Von ausschlaggebender Bedeutung ist auch die Frage nach den zu erzeugenden Sekundärbrennstoffen und der für diese Produkte erforderlichen Konfektionierungstechnologie.



## Anhang A

# Energiebilanz und Druckverlauf

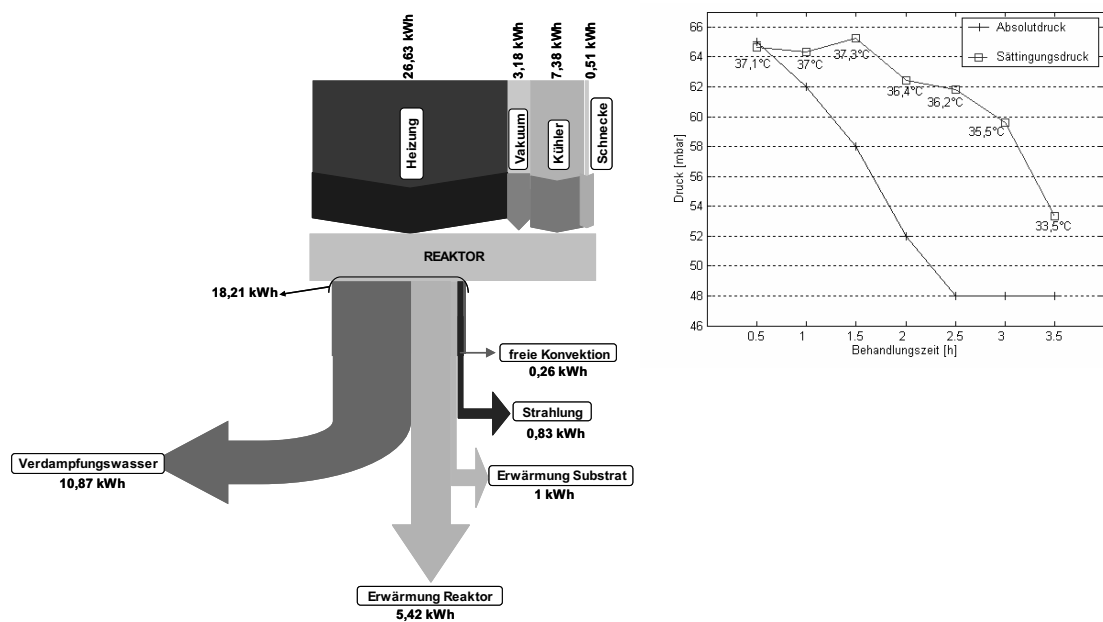


Abbildung A.1: Energiebilanz Versuche bei 50 mbar und 105°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

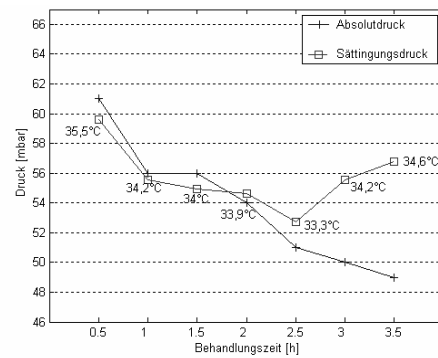
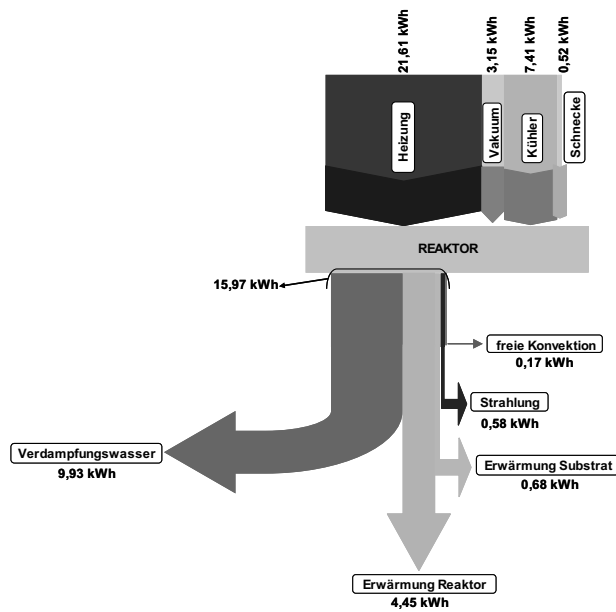


Abbildung A.2: Energiebilanz Versuche bei 50 mbar und 90°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

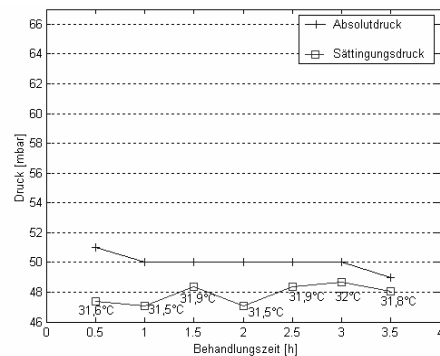
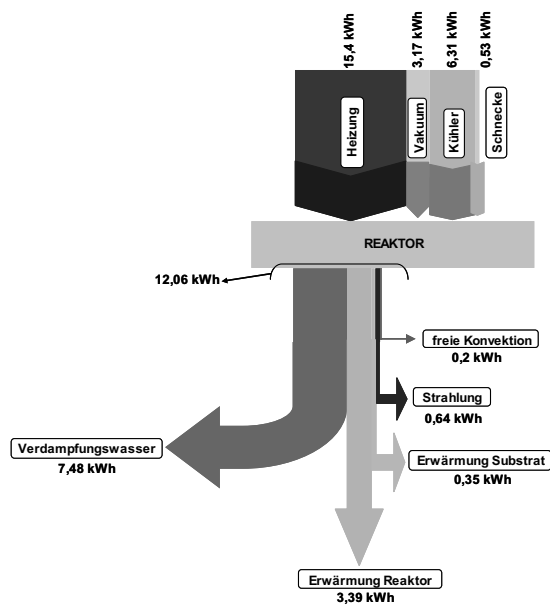


Abbildung A.3: Energiebilanz Versuche bei 50 mbar und 70°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

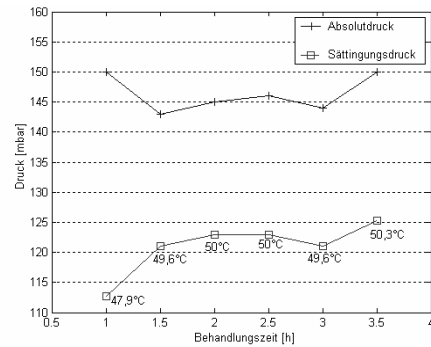
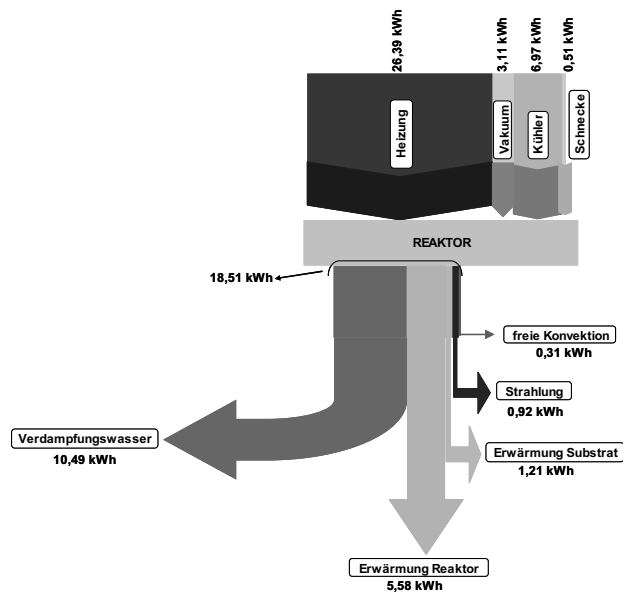


Abbildung A.4: Energiebilanz Versuche bei 150 mbar und 105°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

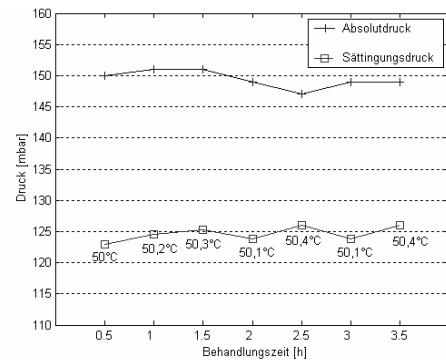
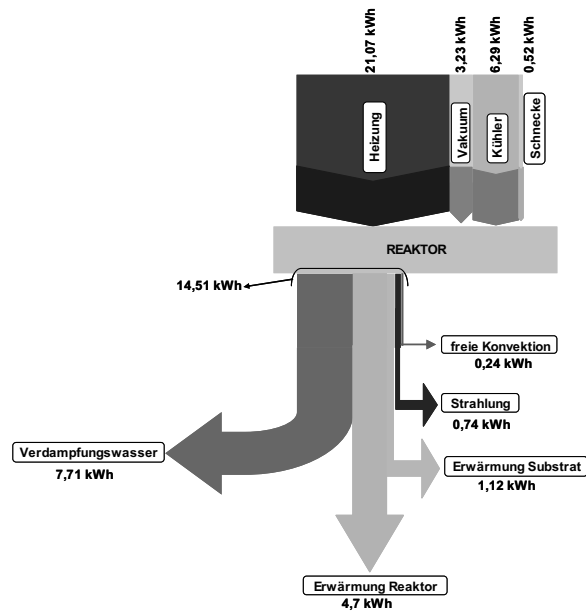


Abbildung A.5: Energiebilanz Versuche bei 150 mbar und 90°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

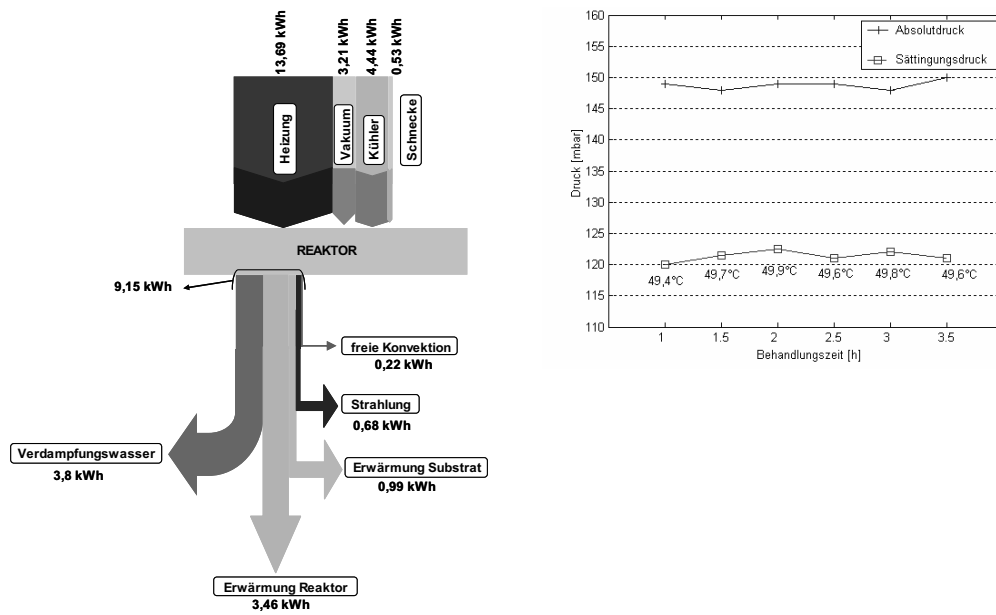


Abbildung A.6: Energiebilanz Versuche bei 150 mbar und 70°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

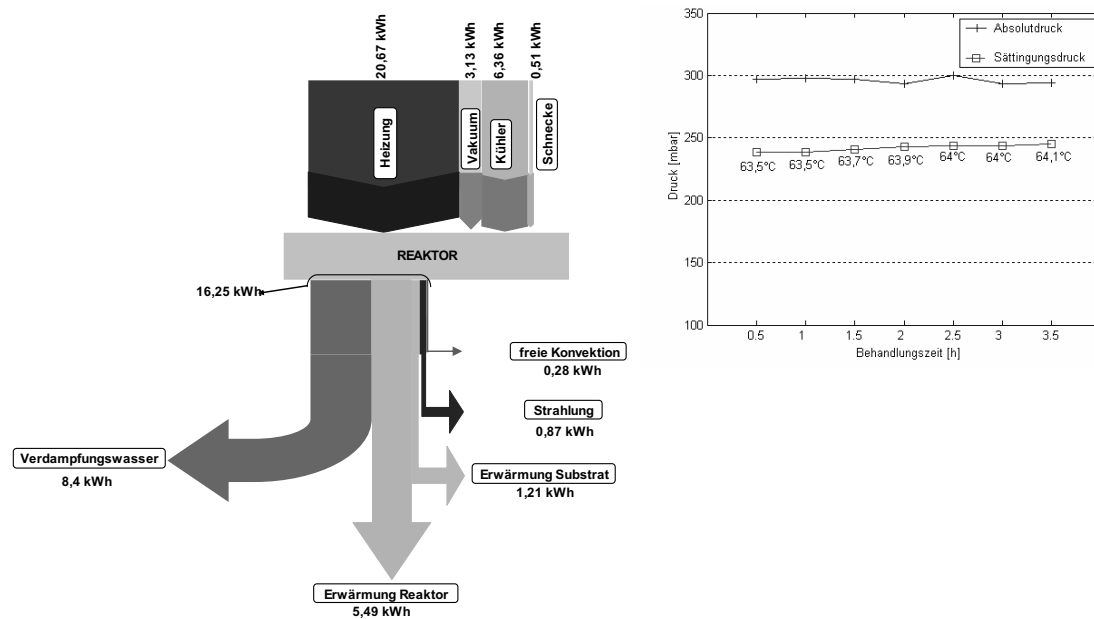


Abbildung A.7: Energiebilanz Versuche bei 300 mbar und 105°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor



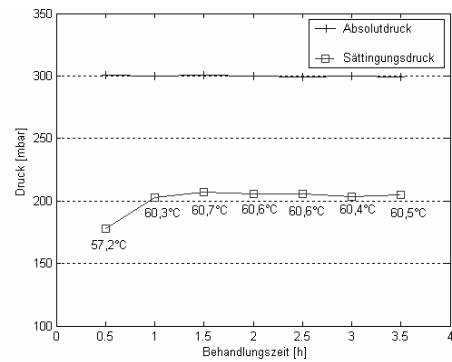
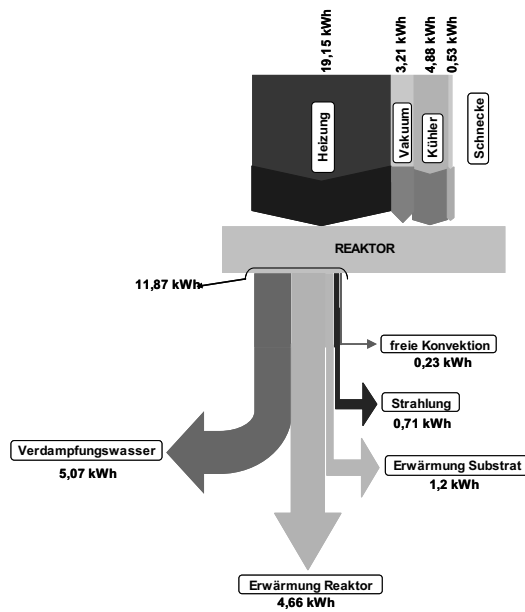


Abbildung A.8: Energiebilanz Versuche bei 300 mbar und 90°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor

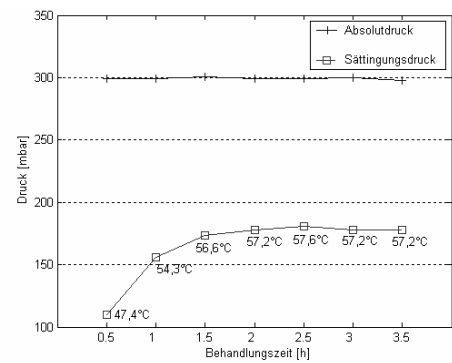
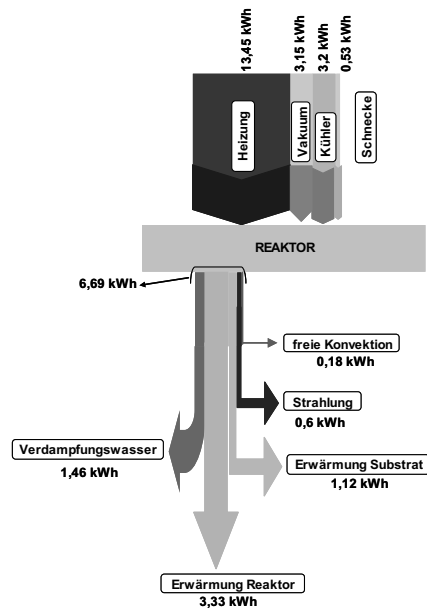


Abbildung A.9: Energiebilanz Versuche bei 300 mbar und 70°C und zeitlicher Druckverlauf im Reaktor



# Literaturverzeichnis

- [1] ARLT, A.: *Systemanalytischer Vergleich zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen aus biogenen Abfällen - am Beispiel von kommunalem Klärschlamm, Bioabfällen und Grünabfall*, Dissertation, Technische Universität Stuttgart, 2003
- [2] BAHR, T.: Vacuum Heat Extraction for the improvement of the efficiency of anaerobic treatment processes. In: *International Conference ORBIT 2006 Biological Waste Management - From Local to Global*, 2006, S. 823–828
- [3] BELLINGHAUSEN, R.; ESPER, G.; GEHRMANN, D.: Trockner. In: *Achema Berichte - Chemie Ingenieur Technik*, 2003, Nr. 75, S. 1706
- [4] BENAVIDES, E.: Vacuum Drying Plants for Evaporator Concentrates. In: TUCSON, AZ (Hrsg.): *WMS01 Conference*, 2001
- [5] BENDIX, D.: Stand und Perspektiven des Korrosionsschutzes in Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung. In: ENTWICKLUNGSZENTRUM, ATZ (Hrsg.): *Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik*, 2006, S. 1–9
- [6] BUX, M.; BAUMANN, R.: Solare Trocknung von Klärschlamm: Verbreitung, Leistung und Kosten (Solar drying of sewage sludge: Scope, performance, and costs). In: *KA. Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 50, 2003, Nr. 6, S. 732
- [7] CERBE, G.: *Einführung in die Thermodynamik*. Bd. 12. Auflage. Hanser Verlag, 1999
- [8] COX, D.: Using a batch vacuum dryer to protect workers, the environment, and heat-sensitive materials. In: ENTWICKLUNGSZENTRUM, ATZ (Hrsg.): *Powder and Bulk Engineering*, 1991, S. 40–46

- [9] DACH, J.: *Zur Deponiegas- und Temperaturentwicklung in Deponien mit Siedlungsabfällen nach Mechanisch-Biologischer Abfallbehandlung*, Dissertation, Institut WAR - Technische Universität Darmstadt, 1998
- [10] DOLLE, L.; HOPPE, C.; WEFING, H.: Behandlung und thermische Verwertung von Restabfall aus Haushalten und Gewerbe. In: *Müll und Abfall* , 2000, Nr. 7
- [11] DOLLE, L.; VOLLMER, F.; WEFING, H.: Abfallbehandlungsmethoden für Restabfall mit Herstellung von Sekundärbrennstoff. In: *Müll und Abfall* , 2002, Nr. 3
- [12] EVRIPIDIS, I.; SCHLÜNDER, E.: Kombinierte Kontakt- und Konvektionstrocknung von rieselfähigem Trocknungsgut in einem Trommeltrockner. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 63, 1991, Nr. 8, S. 835–837
- [13] FRICKE, K.; BAHR, T.; ÁVILA, K.; JORCZIK, B.: Einsatzmöglichkeiten der Vakuum-Siede-Behandlung als innovatives Verfahren zur Behandlung von Restabfällen und Biomassen. In: *Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft*, 2004
- [14] FRICKE, K.; HAKE, J.; HÜTTNER, A.; MÜLLER, W.; SANTEN, H.; WALLMANN, R.; TURK, T.; MÜLLHANDBUCH (Hrsg.): *Aufbereitungstechnologien für Anlagen der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung*. Band 5. Erich Schmidt Verlag, 2003 ( Kennzahl 5615)
- [15] FRICKE, K.; MUELLER, W.: Bewertung der Vakuumtrocknung zur Trocknung von Perkulationsoutput. In: *Bericht der TU Braunschweig und IGW Fricke und Turk GmbH*, 2002
- [16] FRICKE, K.; SANTEN, H.; BAHR, T.: Mechanisch-Biologische Verfahren zur Restabfallbehandlung - Perspektiven und Visionen. In: ANS (Hrsg.): *Von der Entsorgungswirtschaft zur Ressourcenwirtschaft - Leipzig*, 2005, S. 137–198
- [17] GNIELINSKI, V.; MERSMANN, A.; THURNER, F.: *Verdampfung, Kristallisation, Trocknung*. Vieweg Verlag, 1993
- [18] GRASSMANN, P.; WIDMER, F.: *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*. 3.Auflage. Walter de Gruyter Verlag, 1997
- [19] HAAS, H.: Anwendung von Vakuum in der Trocknungstechnik. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 27, 1955, Nr. 6, S. 357–363

- 
- [20] HÄTZELT, A.; TU-BRAUNSCHWEIG (Hrsg.): *Thermodynamische Analyse des Rotteprozesses innerhalb eines geschlossenen Systems im Hinblick auf eine grosstechnische Realisierung*. 2000
- [21] H.BÄHR; STEPHAN, K.: *Wärme- und Stoffübertragung*. Dritte Auflage. Springer-Verlag, 1998
- [22] HELL, F.: *Grundlagen der Wärmeübertragung*. VDI-Verlag, 1982
- [23] HOFFMANN, E.; KRAGTING, M.: Trommeltrockner für alternative Brennstoffe. In: *WLB-Wasser, Luft und Boden* , 2006, Nr. 3-4, S. 54–56
- [24] IRMSCHER, D.; BRAUN, B.: Trockner. In: *Chem.-Ing.-Tech.* 57, 1985, Nr. 12, S. 1074
- [25] JORCZIK, B.; DIPLOMARBEIT (Hrsg.): *Vakuumsiedebehandlung als innovatives Verfahren zur Trocknung von Siedlungsabfällen und Biomasse*. Leichtweiss Institut Abt. Abfallwirtschaft der TU Braunschweig, 2004
- [26] JORISCH, W.: *Vakuumtechnik in der Chemischen Industrie*. Wiley-VCH Verlag, 1999
- [27] JOUSTEN, K.: *Wutz Handbuch Vakuumtechnik Theorie und Praxis*. 8. Auflage. Vieweg Verlag, 2004
- [28] KEEY, R.B.: *Drying - Principles and Practice*. Pergamon Press, 1972
- [29] KIRSCHBAUM, H.; ORTH, M.: Trocknungsverfahren zur Vorbehandlung von Restabfällen. In: *Müll und Abfall* 2, 2002, S. 69–72
- [30] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser Verlag, 1998
- [31] KLINKE, G.: Warum Verdampfen unter Vakuum? In: *Vakuum in Forschung und Praxis* , 2001, Nr. 1, S. 15–18
- [32] KNEULE, F.: *Das Trocknen*. Band 6. Verlag H. R., 1959
- [33] KNOCHE: *Stoffdaten zum System Ammoniak / Ammonium / Wasser*. TK Verlag, 1997
- [34] KOPP, J.: *Wasseranteile in Klärschlammuspensionen*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2001

- [35] KRAGTING, M.; HOFFMANN, E.; IN THOMÉ-KOZMIENSKY ERSATZBRENNSTOFFE 2 (Hrsg.): *Thermische Trocknung der heizwertreichen Restabfallfraktion mit Trommeltrockneranlagen von Vandenbroek*. TK Verlag, 2002
- [36] KRANERT, M.: *Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Müll*, Dissertation, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität von Stuttgart, 1981
- [37] KRANERT, M.; ZUR ABFALLWIRTSCHAFT, Stuttgarter B. (Hrsg.): *Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung*. Bd. Band 33. Erich Schmidt Verlag Bielefeld, 1988
- [38] KRAUS, J.: *Herstellung von Leichtzuschlagstoffen aus Klärschlamm*, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften von der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2003
- [39] KRISCHER, O.: *Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Bd. Erster Band. Springer-Verlag, 1992
- [40] KRISCHER, O.; ROHNALTER, H.: Wärmeleitung und Dampfdiffusion in feuchten Gütern. In: *VDI-Forschungsheft* , 1940, Nr. 402
- [41] KRÖLL, K.: *Trockner und Trocknungsverfahren*. Bd. Zweiter Band. Springer-Verlag, 1978
- [42] KRÖLL, K.; KAST, W.: *Trocknungstechnik - Trocknen und Trockner in der Produktion*. Bd. Dritter Band. Springer-Verlag Berlin, 1989
- [43] KRÖMER, E.: *Thermische Fest-/Flüssig-Trennung in wasserhaltigen Steinkohle-Feinstpartikelkollektiven durch Vakuum-Kondensations-Trocknung*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 1987
- [44] KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S.: *Advanced Drying Technologies*. Marcel Dekker Verlag, 2002
- [45] LEMANN, M. F.: *Verfahrenstechnik und Umwelt*. Peter Lang Verlag, 2000
- [46] LIEBENEINER, R.; DIPLOMARBEIT (Hrsg.): *Möglichkeiten der Steigerung des Biogasertrages durch vorherige Vakuum-Siede-Extraktion zu vergärender Biomassen und Abfallstoffe*. Leichtweiss-Institut Abt. Abfallwirtschaft der TU Braunschweig, 2006

- [47] LYKOW, A.: *Experimentelle und theoretische Grundlagen der Trocknung*. VEB Verlag Technik Berlin, 1955
- [48] MORENO, L.: *Composting Household Refuse by Forced Aeration*, Dissertation, Department of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1982
- [49] MUJUMDAR, A. S.: *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker Verlag, 1987
- [50] NEUMANN, R.: Vakuumkonzentration - Effektiver Einsatz von Vakuumkonzentratoren im Laboralltag. In: *MB Industrie Vertretungen Baumann, Seminarunterlagen der Seminar Gefriertrocknung und Vakuumkonzentration, 23. Okt. im Unterschleissheim*, 2002
- [51] N.N.: *VDI Richtlinien - Manuelle Staubmessung in strömenden Gasen Gravimetrische Bestimmung*. VDI Verlag, August 1993 (Blatt 7 VDI 2066)
- [52] N.N.: *Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung*. VCH Verlag, 1994
- [53] N.N.: *VDI-Wärmeatlas*. 7.Auflage. VDI Verlag, 1994
- [54] N.N.: *Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen*. Abschlussbericht der IBA GmbH, BZL GmbH und CUTEC GmbH, Umweltbundesamt Projektträger des BMBF, 1998
- [55] N.N.: *TA Luft - Anlagen zum Trocknen von Abfällen*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Juli 2002
- [56] N.N.; UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.): *Abwasserverordnung für Oberirdische Ablagerung von Abfällen Anhang 51*. 2004
- [57] N.N.: *Merkblatt ATV-DVWK-M 379 Klärschlamm-trocknung*. 2004
- [58] N.N.; NEWS, IFAT München AVA U. (Hrsg.): *VacuDrying System*. 2005
- [59] N.N.: *MBA-Steckbriefe*. ASA Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung, Februar 2007
- [60] OCHSNER, K.: *Wärmepumpen in der Heizungstechnik: Praxishandbuch für Installateure und Planer*. 3. neubearb. Auflage. C. F. Müller Verlag, 2005

- [61] PRECHTL, S.; FAULSTICH, M.: Ursachen und Mechanismen der Korrosion in biologischen Anlagen. In: SULZBACH-ROSENBERG, ATZ E. (Hrsg.): *Verfahren und Werkstoffe für die Energietechnik Korrosion in Anlagen zur regenerativen Energieerzeugung*, 2006, S. 69–86
- [62] PUPP, W.; HARTMANN, H.: *Vakuum-Technik: Grundlagen und Anwendungen*. Hanser Verlag, 1991
- [63] REGIER, M.: Mikrowellen- und Mikrowellen-Vakuum-Trocknung von Lebensmitteln. In: *Chemie Ingenieur Technik*, 2004, S. 424
- [64] ROTH, H.: *Trocknungsprozesse*. Akademie-Verlag Berlin, 1989
- [65] ROTTER, S.; LÖSCHAU, M.; IN ERSATZBRENNSTOFFE 4, Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Energiebilanzen von Entsorgungsnetzen*. TK verlag, 2004
- [66] SABERY, F.: *Modell zur Vorkalkulation von mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2004
- [67] SANTEN, H.: ISKA - Konzept mit Perkolation - Neue Chance für die Vergärung. In: *63.Informationsgespräch des ANS e.V., Berlin*, 2002, S. 69–84
- [68] SCHELLE, R.; SANDER, K.; UNVERÖFFENTLICHTES LEHRMATERIAL DES INSTITUTS FÜR ENERGIEWIRTSCHAFT UND RATIONELLE ENERGIEANWENDUNG DER UNIVERSITÄT STUTTGART (Hrsg.): *Energetische Betrachtung von Trocknungsverfahren*. 1999
- [69] SCHLÜNDER, E.-U.: Selective Drying of Mixture-Containing Products. In: UNIVERSITY, Mcgrill (Hrsg.); ENSIC-INPL, France (Hrsg.): *Drying 89*, 1989
- [70] SCHOLZ, R.; BECKMANN, M.; SCHULENBERG, F.: *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren*. B. G. Teubner Verlag, 2001
- [71] SCHUBERT, H.: *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*. Springer Verlag, 1982
- [72] SCHULENBURG, F.: *Energetische Bewertung thermischer Abfallbehandlungsanlagen unter Berücksichtigung verschiedener Prozessführungen*, Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1999
- [73] SCHWING, E.; MÜLLHANDBUCH (Hrsg.): *Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung*. Erich Schmidt Verlag, 1997



- [74] SINGLEY, M.: *Sludge composting and utilization*. Rutgers Press, 1981
- [75] SMOLLEN, M.: Evaluation of municipal sludge drying and dewatering with respect to sludge volume reduction. In: *Water Science and Technology*, 1990, S. 153–161
- [76] STRAUB, F. J.: *Nutzung von Abwärme aus einem Dampf-Heizkraftwerk zur energieoptimierten Trocknung von Grüngut*, Dissertation, Technische Universität München, 2002
- [77] SUTTOR, W.; JOCHEM, E.; FACHARTIKEL IM RAHMEN DER INITIATIVE ENERGIE EFFIZIENT NUTZEN SCHWERPUNKT STROM, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (Hrsg.): *Blockheizkraftwerke (BHKW) - Eine Möglichkeit zur Minderung von Energiekosten*. 1996
- [78] TAYLOR, G.; HOARE, M.: The membrane-based concentration and the vacuum drying of proteins and enzymes. In: UNIVERSITY, Mcgrill (Hrsg.); ENSIC-INPL, France (Hrsg.): *Drying 89*, 1989
- [79] THIEL, S.; IN ERSATZBRENNSTOFFE 4, Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): *Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen als stoffstromspezifische Bausteine kommunaler Abfallwirtschaftskonzepte*. TK verlag, 2004
- [80] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.: *Recycling von Abfällen 1*. EF-Verlag, 1989
- [81] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.: *Ersatzbrennstoffe 4 - Optimierung der Herstellung und der Verwertung*. TK Verlag, 2004
- [82] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.: *Optimierung der Abfallverbrennung 1*. TK Verlag, 2004
- [83] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.; THIEL, S.: *Restabfallentsorgung in Europa, Texte zur Abfall- und Energiewirtschaft*. Bd. Band 3. TK Verlag, 2007
- [84] TSOTSAS, E.: *Über die Wärme- und Stoffübertragung in durchströmten Festbetten - Experimente, Modelle, Theorien*. VDI Verlag Düsseldorf, 1990
- [85] TURK, T.; HÜTTNER, A.; HAKE, J.; IDELMANN, M.: Stellenwert und Leistungsfähigkeit der anaeroben Restabfallbehandlung in Europa. In: WEIMAR, International Conference O. (Hrsg.): *Abfall- und Ressourcenwirtschaft*, 2006, S. 165–185
- [86] VAUCK, W.; MÜLLER, H.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. DVG Verlag, 2000

- [87] VOCKRODT, S.; LEITHNER, R.: Trocknung von feuchtem Klärschlamm zur Erhöhung des Klärschlammeinsatzes im Kraftwerk Buschhaus. In: *Abschlussbericht, Institut für Wärme- und Brennstofftechnik der TU Braunschweig*, 2003
- [88] WAGNER, W.: *Wärmeübertragung*. 4.Auflage. Vogel Buchverlag, 1993
- [89] WIEMER, K.; KERN, M.: *Mechanisch-Biologische Restabfallbehandlung nach dem Trockenstabilisatverfahren*. M.I.C. Baeza-Verlag, 1995
- [90] WILLMANN, M.: *Stabilisierung von pharmazeutischen Proteinlösungen durch Vakuumtrocknung*, Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2003